



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

# **ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE DUCTILIDAD Y RESISTENCIA DEL HORMIGÓN AL REFORZARLO CON MICROFIBRAS DE PVA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

NICOLÁS ADRIÁN VÁSQUEZ GRISOLIA

**PROFESOR GUÍA:**

LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:**

DAVID SILVA SAAVEDRA

FABIAN ROJAS BARRALES

SANTIAGO DE CHILE

2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
POR: NICOLÁS ADRIÁN VÁSQUEZ GRISOLIA  
FECHA: 2019  
PROFESOR GUÍA: SR. LEONARDO MASSONE S.

## **Estudio de la variación de ductilidad y resistencia del hormigón al reforzarlo con microfibras de PVA**

El siguiente trabajo presenta un estudio del comportamiento de hormigones tradicionales al ser reforzados con microfibras de polivinilo de alcohol. Específicamente, este analiza cambios en propiedades mecánicas de este material como lo son su resistencia y su ductilidad. Esto último, sin dejar de lado la posibilidad de estudiar otros fenómenos que se pudieran observar a lo largo de la investigación. Esta investigación consiste tanto en experimentación en laboratorio como en análisis mediante el uso de software computacional. La primera parte mencionada contempla la elaboración de tandas de probetas cilíndricas de hormigón con y sin fibra. Diferentes cantidades de fibra son utilizadas en distintas mezclas buscando contrastar resultados con mezclas sin fibra. De igual manera, las proporciones agua/cemento y áridos/cemento y el tamaño máximo de árido en cada set de probetas son diferentes con el fin de obtener un espectro mayor de resultados y de esta forma poder realizar un análisis más completo. Existe un primer grupo de probetas que se elabora para llevar a cabo ensayos preliminares a modo de prueba y obtener algún tipo de tendencia general. Un segundo grupo para ajustar dosificaciones y un último grupo, mucho más amplio en cantidad que el primero, el cual es necesario para efectuar un estudio más complejo y global del comportamiento del hormigón tradicional reforzado con microfibras de PVA. De las probetas finales, cuyas variables más características son: la cantidad de fibra y el tamaño máximo de árido (0%, 1% y 2% de fibra y tamaños de árido de 0.3 mm, 4.75 mm y 9.5 mm), se obtiene que a compresión la resistencia siempre es mayor (entre 5% y casi 400% veces) sin microfibra que con microfibra, mientras que la deformación última, en casos con PVA puede llegar a ser hasta 8 veces mayor. De esta etapa, sin embargo, no es posible obtener resultados claros a tracción. Por otro lado, con lo que respecta a la parte computacional, diferentes softwares se utilizan como herramienta para procesar la información obtenida en el campo experimental. Además, se realizan parametrizaciones que representen las curvas obtenidas y así obtener fórmulas generales. Dichas modelaciones, provenientes de combinar modelos ya ampliamente conocidos con regresión de datos experimentales, son utilizadas en un análisis de tipo Pushover en el programa SAP2000 con el fin de tener una idea general del comportamiento estructural del hormigón fibroreforzado. Para efectos prácticos, el análisis es llevado a cabo en una torre de 10 pisos de muros con confinamiento de borde. De esto último y empleando las mismas cantidades de fibra e iguales tamaños máximos de árido que en las probetas finales, se puede constatar que para todos los casos, previo a los 0.6 metros de desplazamiento de techo, la carga requerida es siempre mayor en hormigones sin PVA alcanzando a ser esta, en casos extremos como aquellos con árido de 9.5 milímetros, hasta 1.2 veces mayor.

*Para todos aquellos que me han acompañado y apoyado a lo largo de mi vida, sobre todo para ti,  
Mamá, que has estado siempre ahí presente.*

## Agradecimientos

Agradecimientos especiales a todos quienes me ayudaron durante el largo proceso de esta investigación. A Pedro Soto y Víctor González por apoyarme con la preparación de los moldes para las probetas, la realización de los ensayos y brindarme un espacio en su laboratorio. A Rubén Boroschek, Omar González, Mario Carrillo, y Francisco Hernández por permitirme utilizar las instalaciones del laboratorio de sólidos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. A Mario, Omar y los ayudantes del laboratorio, en particular, por ayudarme con el mezclado de las muestras de hormigón y otras labores relacionadas a esto. A IDIEM por el aporte de áridos (incluida la entrega de información relevante sobre sus propiedades) y herramientas para el cálculo de las dosificaciones. A los integrantes de la comisión: Leonardo Massone, David Silva y Fabián Rojas por aconsejarme sobre los distintos aspectos técnicos y teóricos de esta memoria. A mi amigo, Eduardo Bedecarratz por ayudarme y estar presente durante toda esta etapa. A la gente en Santolaya por permitirme trabajar con ellos durante la última fase de esta memoria. A todos los antes mencionados y a todos mis amigos, familiares y cercanos, por apoyarme aunque fuera solo con su compañía física o a distancia. A todos ustedes, muchas gracias.

# Tabla de contenido

<b>1. Introducción</b> .....	1
1.1 Motivación .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo general .....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	2
1.3 Metodología .....	3
1.4 Alcance .....	4
1.5 Estructura de la memoria .....	4
<b>2. Revisión bibliográfica</b> .....	6
2.1 El hormigón y sus propiedades .....	6
2.2 Fibras como refuerzo .....	8
2.3 PVA en hormigón y mezclas similares .....	11
<b>3. Programa experimental y resultados</b> .....	19
3.1 Etapa preliminar .....	19
3.2 Selección de dosificación .....	28
3.3 Probetas finales .....	32
<b>4. Análisis</b> .....	40
4.1 Parametrización y modelos .....	40
4.1.1 Compresión No Confinada .....	40
4.1.2 Compresión Confinada .....	47
4.1.3 Tracción .....	49
4.2 Análisis Pushover .....	51
<b>5. Conclusiones</b> .....	55
<b>Bibliografía</b> .....	59
<b>Anexo</b> .....	62

# Índice de figuras

Figura 2.1 Gráfico esfuerzo-deformación tipo del hormigón .....	6
Figura 2.2 Gráfico representativo de zona elástica e inelástica de un material .....	7
Figura 2.3 Fibras actuando como puente al interior de una muestra de hormigón .....	9
Figura 2.4 (a) y (b) Curvas tensión-desplazamiento de ECC a tracción con diferentes tipos de fibra y porcentajes [16].....	12
Figura 2.5 Relación entre resistencia a la compresión y cantidad de PVA (puntos blancos corresponden a mezclado común) [11] .....	13
Figuras 2.6 (a) y (b) Curvas esfuerzo-deformación a compresión (a) sin y (b) con PVA [11].....	14
Figura 2.7 Efecto de relaciones agua/cemento (a), arena/cemento (b) y porcentaje volumétrico de fibra (c) en la resistencia a compresión de ECC con PVA [20].....	16
Figura 2.8 Tipo de granulometría usualmente empleada en probetas de ECC con PVA para mejor rendimiento [22]. .....	17
Figura 3.1 Tamices ASTM .....	20
Figura 3.2 Moldes de PVC sellados con silicona .....	20
Figura 3.3 Granulometría de premezclado Topex .....	21
Figura 3.4 Betonera utilizada en la elaboración de las probetas .....	23
Figura 3.5 Curado del hormigón.....	23
Figura 3.6 Sikadur y superficie de probeta pre y post refrentado .....	24
Figura 3.7 Placas de acero utilizadas para probetas destinadas a tracción .....	24
Figura 3.8 Probetas montadas listas para ser ensayadas a compresión y tracción con anillos y LVDTs.....	25
Figura 3.9 Gráficos de compresión para tanda de mezclas preliminares.....	26
Figura 3.10 Gráficos de tracción para tanda de mezclas preliminares .....	27
Figura 3.11 Granulometría Gravilla 9,5 mm .....	29
Figura 3.12 Granulometría Arena 9,5 mm.....	29
Figura 3.13 Granulometría Arena 4,75 mm.....	30
Figura 3.14 Granulometría Gravilla 0,3 mm .....	30

Figura 3.15 Regresiones obtenidas de mezclas de dosificación para relación entre tensión y w/c.....	31
Figura 3.16 Placas de acero modificadas .....	33
Figura 3.17 Patrón de pintura para fotogrametría.....	34
Figura 3.18 Gráficos de compresión para probetas con Dmax 9,5 mm de las mezclas finales.....	35
Figura 3.19 Gráficos de compresión para probetas con Dmax 4,75 mm de las mezclas finales.....	36
Figura 3.20 Gráficos de compresión para probetas con Dmax 0,3 mm de las mezclas finales.....	37
Figura 3.21 Fisuración de hormigón con microfibra de PVA, a compresión (izq. $\varepsilon =0$ , der. $\varepsilon =0,033$ ).....	38
Figura 3.22 Fisuración de hormigón con microfibra de PVA, a tracción (izq. $\varepsilon =0$ , der. $\varepsilon =0,075$ ).....	38
Figura 3.23 Fisura completamente abierta a tracción que presenta la distribución y orientación del PVA.....	39
Figura 3.24 Efecto de nido generado por la falta de agua tras absorción tanto por parte de los áridos como de la fibra (izq. $\varepsilon =0$ , der. $\varepsilon =0,045$ ) .....	39
Figura 4.1 Comparación entre curva experimental y modelada para MF_A9.5_F0 .....	42
Figura 4.2 Comparación entre curva experimental y modelada para MF_A9.5_F1 .....	43
Figura 4.3 Comparación entre curva experimental y modelada para MF_A9.5_F2 .....	43
Figura 4.4 Comparación entre curva experimental y modelada para MF_A4.75_F0 .....	44
Figura 4.5 Comparación entre curva experimental y modelada para MF_A4.75_F1 .....	44
Figura 4.6 Comparación entre curva experimental y modelada para MF_A4.75_F2 .....	45
Figura 4.7 Comparación entre curva experimental y modelada para MF_A0.3_F0 .....	45
Figura 4.8 Comparación entre curva experimental y modelada para MF_A0.3_F1 .....	46
Figura 4.9 Comparación entre curva experimental y modelada para MF_A0.3_F2 .....	46
Figura 4.10 Ejemplo curva de hormigón confinado sin fibra .....	48
Figura 4.11 Ejemplo curva de hormigón confinado con fibra .....	48
Figura 4.12 Ejemplo tracción sin fibra .....	49
Figura 4.13 Efecto de la fibra en la curva tensión-deformación según Kullaa. [12] .....	50
Figura 4.14 Ejemplo tracción con fibra .....	51

Figura 4.15 Sección de muro y disposición de armadura empleados en el análisis .....	52
Figura 4.16 Discretización, altura del muro analizado y cargas aplicadas .....	52
Figura 4.17 Análisis Pushover para hormigones con Dmax 9,5 mm.....	53
Figura 4.18 Análisis Pushover para hormigones con Dmax 4,75 mm.....	53
Figura 4.19 Análisis Pushover para hormigones con Dmax 0,3 mm.....	54
Figura A.1 Gráficos de tracción para probetas con Dmax 9,5 mm de las mezclas finales .....	63
Figura A.2 Gráficos de tracción para probetas con Dmax 4,75 mm de las mezclas finales .....	63
Figura A.3 Gráficos de tracción para probetas con Dmax 0,3 mm de las mezclas finales .....	64



# Índice de tablas

Tabla 2.1 Propiedades típicas de las fibras [18] .....	10
Tabla 3.1 Propiedades de cemento en premezclado Topex empleado en probetas preliminares.....	21
Tabla 3.2 Propiedades de fibras de PVA empleadas en probetas preliminares y finales .	21
Tabla 3.3 Mezclas preliminares .....	22
Tabla 3.4 Velocidades de los ensayos.....	25
Tabla 3.5 Resultados mezclas preliminares a compresión.....	26
Tabla 3.6 Resultados mezclas preliminares a tracción .....	27
Tabla 3.7 Propiedades cemento empleado en probetas de dosificación y finales.....	28
Tabla 3.8 Propiedades de áridos empleados en mezclas de dosificación y finales.....	29
Tabla 3.9 Primera tanda de mezclas para definir dosificaciones finales .....	31
Tabla 3.10 Segunda tanda de mezclas para definir dosificaciones finales .....	31
Tabla 3.11 Mezclas finales .....	33
Tabla 3.12 Resultados mezclas finales Dmax 9,5 mm a compresión .....	35
Tabla 3.13 Resultados mezclas finales Dmax 4,75 mm a compresión .....	36
Tabla 3.14 Resultados mezclas finales Dmax 0,3 mm a compresión .....	37

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Motivación

El hormigón corresponde a uno de los materiales de construcción más utilizados en Chile. Dada su alta efectividad en compresión pero baja en tracción se suele incorporar barras o mallas de acero en su interior para entregarle aquella resistencia que necesita. Además de esto, dicha adición resuelve otro problema que posee el hormigón, su fragilidad. Al ser frágil el hormigón por sí solo, tiende a romperse ante su baja capacidad de soportar grandes deformaciones. Por estos dos aspectos y por problemas de retracción y temperatura es que se suele exigir una cantidad mínima de acero en el hormigón armado en elementos estructurales.

Así como el acero, otros elementos han sido incorporados en el hormigón en los últimos años con el fin de darle la capacidad de resistir tracciones y deformaciones. Estudios han sido realizados y se ha descubierto que fibras de diversos materiales pueden ayudar aportando diferentes propiedades mecánicas. Las fibras por si solas poseen la capacidad de soportar deformaciones inelásticas incluso con altas cargas involucradas. Dentro del hormigón estas realizan la labor de actuar como puente sosteniendo las fisuras que se generan en la matriz y distribuyendo las cargas a través de esta. Las fibras cumplen el papel de agente disipador de energía y aportan propiedades mecánicas a las mezclas a las que se incorporan. Entre las fibras que se han utilizado con este propósito se encuentran aquellas que son de metal, de carbón, de vidrio, de polietileno, de polipropileno y de polivinilo de alcohol (o PVA), entre otras.

Las fibras de PVA son particularmente resistentes y poseen un módulo de elasticidad alto. Además de esto, son resistentes a los alcalinos y no generan daño ambiental. Por lo mismo, es considerado como un material ideal para la elaboración del hormigón. Su naturaleza hidrófila le permite establecer fuertes enlaces químicos con la matriz de cemento lo cual ayuda particularmente con la prevención de agrietamientos dañinos. Es por esto que se considera que las fibras PVA podrían llegar a reemplazar, al menos hasta cierto porcentaje, una cantidad de acero empleado en el hormigón armado, como por ejemplo, aquel destinado a confinamiento de borde en muros.

En lo que a investigaciones de PVA en hormigón respecta, aquello con lo que más se ha experimentado corresponde a ECC o “Engineered Cementitious Composites”, compuesto que se podría definir de manera básica como “hormigón sin agregado grueso”. Además, en las mezclas se ha utilizado mayoritariamente fibra y no microfibras. Es justamente bajo este contexto que nace la idea de estudiar el comportamiento de microfibras de PVA en hormigón convencional para así poder determinar si la ductilidad y resistencia que estas aportan pueden significar una nueva y eficaz manera de elaborar hormigón. Es importante destacar que, incluso más allá de estudiar el comportamiento del hormigón reforzado con fibra de PVA, es de gran interés en el ámbito de la ingeniería estructural investigar cual es el impacto que puede tener esta mezcla al ser utilizada para la elaboración de elementos estructurales. Lo que es más, dadas las dimensiones de las microfibras, no deja de ser interesante la posibilidad, justamente, de evaluar su comportamiento en elementos estructurales esbeltos que dada su naturaleza, pueden poseer problemas de armado. Por esto mismo, es relevante realizar un estudio de caracterización del hormigón reforzado con microfibras de PVA.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.2 Objetivo principal**

El objetivo principal de este trabajo corresponde a estudiar el aporte en cuanto a ductilidad y resistencia que produce la incorporación de microfibras de PVA al hormigón. Dentro de esta misma investigación también se busca representar y analizar, utilizando los datos obtenidos de una primera parte experimental, el comportamiento teórico de muros de hormigón armado reforzados con PVA.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar los materiales involucrados, sobre todo, aquellas mezclas con microfibras de PVA mediante ensayos a compresión y tracción.
- Obtener parametrizaciones generales que describan las curvas de dichos elementos compuestos.
- Analizar computacionalmente el efecto de la inclusión de PVA en el comportamiento de muros de hormigón armado, de manera de poder determinar, específicamente, el aporte que este presenta en cuanto a resistencia y ductilidad.

## 1.3 Metodología

Para llevar a cabo esta investigación y cumplir con los objetivos previamente mencionados existe una serie de pasos que se debió realizar. Dichos pasos corresponden a la metodología que se empleó durante el desarrollo de la memoria. A continuación, se presenta la metodología aplicada.

1. Revisión bibliográfica: El primer paso consistió principalmente en la búsqueda de material literario de apoyo, en este caso mayoritariamente artículos de revistas científicas y libros especializados, cuyo propósito es entregar al lector una idea general sobre algún tipo de estudio ya realizado. Para el caso específico de esta memoria, la información obtenida a través de este medio sirve como dato preliminar sobre el comportamiento del hormigón ante la adición de fibras y aún más concretamente, microfibras de PVA. De esta manera también se puede realizar una evaluación previa de cómo se deben o pueden hacer los ensayos en lo que respecta a: métodos, materiales, cantidades, proporciones, etc.
2. Caracterización de los materiales: Para explorar el comportamiento del hormigón fibro reforzado lo primero que se debe llevar a cabo es la caracterización de los materiales. Para ello se deben realizar ensayos, tanto con fibra como sin fibra, esto con el fin de comprender mejor los atributos del PVA en el hormigón, cuyas características son menos conocidas. Los ensayos que se deben ejecutar son tanto de compresión como de tracción, ya que así el material se puede estudiar de manera más completa. Los ensayos son aplicados a probetas de diferentes mezclas (variando las cantidades y las proporciones entre sus compuestos) utilizando equipo capaz de entregar la carga y el desplazamiento. Justamente es con estos valores que se puede, posteriormente, realizar un análisis y la caracterización del hormigón.
3. Análisis de resultados: Para cada set de ensayos, se deberá realizar análisis de resultados correspondientes, a través del uso de software computacional. Esto enfocado principalmente en la evaluación y comparación de propiedades mecánicas entre probetas similares. Es gracias al trabajo efectuado en este paso que se puede llegar a concluir sobre la efectividad del uso de fibras de PVA en el hormigón, determinando la resistencia y ductilidad que estas aportan al material.

## **1.4 Alcance**

Esta memoria abarca el estudio de las propiedades mecánicas del hormigón mezclado con microfibras de PVA. Para esto, se realizan experimentos de caracterización de materiales a lotes con distinto número de probetas cilíndricas, con mezclas semejantes entre sí, pero con pequeñas variaciones en cuanto a las cantidades de fibra agregada (1% y 2.5% volumétrico de diferencia entre mezclas). Dichos experimentos corresponden a ensayos de compresión y tracción realizados en una máquina universal en conjunto con la utilización de herramientas de medición de desplazamientos “LVDT”. Todo esto controlando y registrando la carga y el desplazamiento que le son aplicadas a cada probeta de tal forma que se pueda analizar con más detalles, posteriormente, su desempeño.

Ya que por el lado experimental solo se puede llegar a una idea global del comportamiento del hormigón fibro reforzado, esta memoria también contempla el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos. Mediante cálculos y elaboración y comparación de gráficos los resultados se pueden contrastar de forma más directa, facilitando la posibilidad de llegar a conclusiones. Todo esto es posible realizarlo con la ayuda de software computacional, dada la facilidad que entregan los equipos con los que se llevan a cabo los ensayos, de registrar digitalmente los datos. Por lo tanto, en resumen, el siguiente trabajo presenta una etapa de experimentación, con ensayos a materiales, como a su vez una etapa de análisis, con desarrollo numérico y elaboración de gráficos. Finalizadas estas dos etapas se encuentra una tercera y última etapa, cuyo propósito es entregar al lector las conclusiones a las que el autor ha llegado sobre la conducta global y específica de cada aspecto del hormigón reforzado con PVA.

## **1.5 Estructura de la memoria**

El capítulo 2, consiste en una amplia revisión bibliográfica con respecto a hormigón, fibras en general y hormigón y ECC reforzados con PVA. Se entrega información sobre investigaciones ya realizadas y conclusiones a las que se ha llegado en temas como: propiedades básicas del hormigón, de las fibras y el PVA, aporte en propiedades mecánicas entregadas por fibras de PVA al hormigón, relaciones de cantidad de fibra en mezclas cementicias, ECC y más. Este capítulo pretende familiarizar al lector con términos y conceptos importantes que se trataran en esta memoria, de igual manera de entregar una idea general de que es lo que se puede esperar de este trabajo.

Posteriormente, en el capítulo 3, se describe la metodología experimental empleada para llevar a cabo la fabricación de probetas y sus respectivos ensayos. Se explica y expone detenidamente los pasos que se tomaron de comienzo a fin hasta la obtención de los datos necesarios para el desarrollo de esta investigación. Esto sin dejar de lado la presentación de los materiales y las herramientas más importantes de esta etapa. El otro propósito de este capítulo es el de entregar todos los resultados provenientes de los ensayos. Los valores obtenidos son presentados de manera completa y ordenada, en tablas y gráficos.

Seguido de esto, en el capítulo 4, se estudian con más detalle los resultados a través de parametrización de curvas, modelación y análisis con la ayuda de software computacional. De este capítulo es justamente de donde proviene la información necesaria para poder evaluar si efectivamente la adición de microfibras de PVA al hormigón se traduce en cambios significativos.

Finalmente, el capítulo 5, consta de las conclusiones a las que se ha podido llegar tras todo el trabajo realizado. Si bien, en capítulos anteriores ya se puede tener una idea general de la respuesta a la pregunta que plantea esta memoria sobre el hormigón con microfibras de PVA, es en esta parte que se establece concreta y resumidamente, si existe un aumento en la ductilidad y la resistencia, además de otros aspectos que se hayan observado a lo largo de la investigación, considerando a su vez, posibles recomendaciones a futuros investigadores de hormigón reforzado con PVA.

## Capítulo 2

# Revisión bibliográfica

### 2.1 El hormigón y sus propiedades

Dada la importancia que tiene el hormigón como material de construcción en Chile y el mundo, a lo largo de los años se han dedicado numerosas investigaciones a determinar sus propiedades y cómo se comporta frente a diferentes escenarios y fenómenos de origen natural y humano. Considerando la cantidad y variedad de tipos de cargas a las que se ve afectada una estructura en el día a día, ya sean cargas vivas, muertas, sísmicas o de viento, entre otras [9] los elementos que posee aquella estructura se ven sometidos a diversos esfuerzos y deformaciones. Realizando ensayos de esfuerzo aplicado a probetas de hormigón y analizando los resultados de dichos ensayos, es posible comprender de mejor manera este material desde un punto de vista mecánico. Este proceso corresponde a una fracción de lo que se denomina como “caracterización del material”. Dentro de los esfuerzos involucrados en una estructura, los más simples y característicos con lo que respecta a propiedades mecánicas, corresponden a la compresión y la tracción. Para efectos de esta investigación, comprender como reacciona el hormigón ante estos esfuerzo uniaxiales (Figura 2.1) lleva a entender por qué este material podría llegar a requerir de la adición de otros elementos para mejorar sus propiedades.

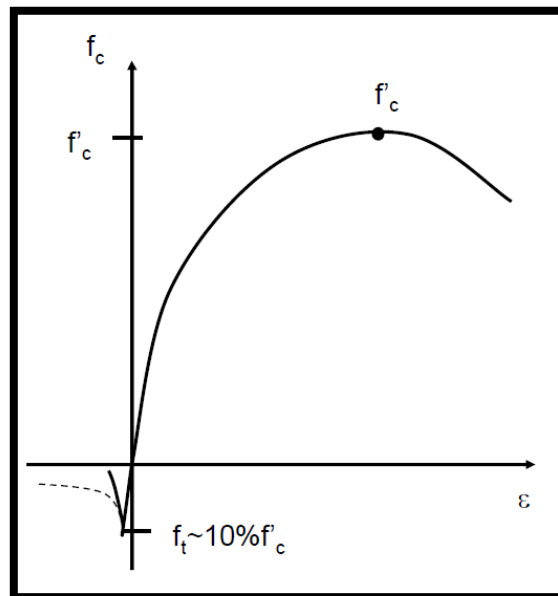


Figura 2.1 Gráfico esfuerzo-deformación tipo del hormigón (der. Compresión, izq. Tracción).

Los estudios que se han realizado y lo que ha determinado la práctica indican que el hormigón posee una buena resistencia a la compresión, siendo justamente esta magnitud la que caracteriza y sirve como etiqueta a los diferentes tipos de hormigones tradicionales que se pueden elaborar. Sin embargo, no es este el caso con la tracción, esfuerzo al cual el hormigón no resiste más allá de un 10% de lo que resiste a compresión. La explicación de esto proviene del hecho que este material corresponde a una mezcla con una microestructura compleja y heterogénea, a diferencia de otros materiales, como los metales, que al ser homogéneos responden mejor a los esfuerzos de tracción [18]. Además, cabe destacar la importancia de las deformaciones, dado que estas también limitan la vida útil del material. Para esto, se debe considerar que en el hormigón, al igual que en todos los materiales, existe una primera etapa denominada “deformación elástica” durante la cual, el elemento se deforma de manera proporcional al esfuerzo aplicado y en caso de dejar de ser forzado, este volverá a su forma original. Es importante mencionar que la magnitud que relaciona el esfuerzo y la deformación en esta etapa es conocida como “módulo de elasticidad” y para el hormigón varía entre  $14 \times 10^3$  y  $40 \times 10^3$  MPa. Posteriormente, se puede apreciar lo que es conocido como la “deformación inelástica” o “deformación plástica” la cual es, al igual que la tracción, otro punto débil del hormigón. En esta fase el elemento ya no puede volver a su forma original y existe una cierta cantidad de deformación,  $2 \times 10^{-3}$  aproximadamente en hormigón, con la cual se llega a dicha zona. A diferencia de otros materiales, este al ser un material compuesto de matriz cementante posee la característica de ser frágil, es decir de baja o hasta nula capacidad de deformación plástica [2]. Por el contrario, si un material (como lo es en el caso de los metales) es capaz de soportar grandes deformaciones inelásticas, se dice que el material es dúctil. Las regiones son fácilmente apreciables en la Figura 2.2.

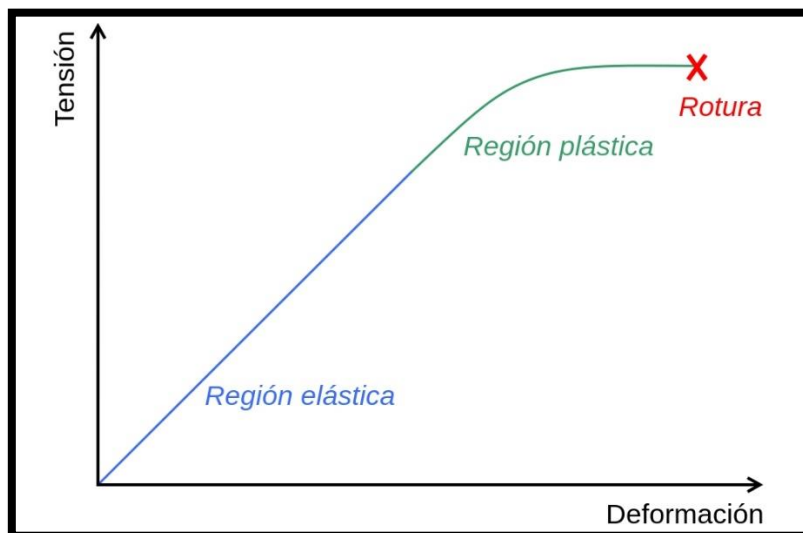


Figura 2.2 Gráfico representativo de zona elástica e inelástica de un material.



Precisamente de las debilidades del hormigón se origina la necesidad de reforzar con otros materiales la mezcla, de manera de obtener un producto con mejores resultados. En obras es común el uso de lo que se conoce como “hormigón armado”, el cual nace justamente del requerimiento de los elementos estructurales de resistir grandes esfuerzos y deformaciones de todo tipo. Estos consisten en hormigones cuya singularidad es poseer inserto en su interior, largas barras de acero. Esta adición brinda y mejora propiedades mecánicas tales como la capacidad de resistir tracción y un aumento en la ductilidad del elemento resultante. Sin embargo, la inclusión de acero no implica que el hormigón se convierta en un material a prueba de todo, muy por el contrario, existen factores que hay que considerar y que deben ser controlados. Desde problemas con la trabajabilidad del hormigón hasta potenciales temas térmicos e incluyendo la corrosión de la que se deben proteger las barras de acero, se encuentran presentes un número de consideraciones adicionales que se deben tomar en cuenta a la hora de elaborar una mezcla de este tipo. Además de esto, siempre habrá limitaciones en cuanto a las resistencias máximas que este pueda llegar a alcanzar. Buscando solucionar esto mismo es que surgen los “aditivos”, químicos y minerales dedicados a resolver estos problemas. No obstante, al fortalecer estos solo ciertos aspectos muy específicos del hormigón (al igual que el refuerzo de acero) y ser de costo muy elevado, se produce un interés dentro del rubro por utilizar nuevos elementos que lleva a los investigadores a probar con nuevos y, quizás más eficientes materiales, como lo son las fibras.

## **2.2 Fibras como refuerzo**

Las fibras corresponden a filamentos cuyo origen puede ser natural, artificial o sintético y que dada su variedad en tamaños y composiciones, pueden ser utilizadas con muchos fines diferentes. Por supuesto, uno de los posibles usos que se le ha dado es estructural y dependiendo de su tamaño se les puede denominar “microfibras” o “macrofibras”. Las fibras se han utilizado en materiales cuya resistencia a la tracción es considerablemente menor que a compresión, desde tiempos ancestrales. Por ejemplo, en el antiguo Egipto, la paja era utilizada como refuerzo para mejorar el comportamiento de algunos ladrillos [3]. Hoy en día, la incorporación de fibras al hormigón y a otros materiales de construcción es cada vez más común. A un punto, que a aquellos hormigones que poseen algún tipo de fibra como componente discontinuo se les conoce como “hormigón fibroreforzado” u “hormigón reforzado con fibra” (en inglés se le han asignado las siglas FRC por “fibre reinforced concrete”). La elaboración de fibras para refuerzo se ha industrializado a lo largo de los años y al día de hoy existen más de 10 tipos diferentes, entre ellas fibras de acero, de vidrio, de celulosa y de diversos polímeros [18, 3]. Dependiendo del uso específico que se le desee dar y el capital disponible, una fibra puede ser más conveniente que la otra. Sin embargo, a grandes rasgos, se ha observado que el hormigón reforzado con fibra tiene una tendencia general a adquirir mayor capacidad de resistencia a deformaciones inelásticas y que al interior de la mezcla, las fibras actúan como puentes en las fisuras generadas por las cargas, disipando la energía aquí presente. Es precisamente esta función tipo puente por parte de la fibra la que le proporciona un poco más de ductilidad al hormigón (apreciable en Figura 2.3) [23].

No obstante, es importante recalcar el hecho de que la fibra no puede sustituir completamente a las barras de acero. Si bien, la adición de este componente puede significar un relativo aumento en capacidad de resistir carga, donde mejor se desempeña es en la prevención de fisuración. Por lo mismo, solamente se puede reemplazar un cierto porcentaje de refuerzo convencional con fibra y no es recomendable sobrepasar dicho porcentaje. Bajo este mismo principio, existen tres ocasiones particulares en las que se considera conveniente el uso de fibras en hormigón: elementos pequeños sin solicitaciones de carga muy elevadas, en donde por un tema de espacio no se pueda colocar refuerzo tradicional (pudiendo usarse en elementos con mayores cargas siempre y cuando el hormigón reforzado de esa zona sea específicamente diseñado para ser de alto rendimiento y con alto porcentaje de fibra), piezas estructurales cuyas cargas y deformaciones serán puntualmente altas y finalmente, secciones en donde se desea controlar posibles problemas de fisuración [3].

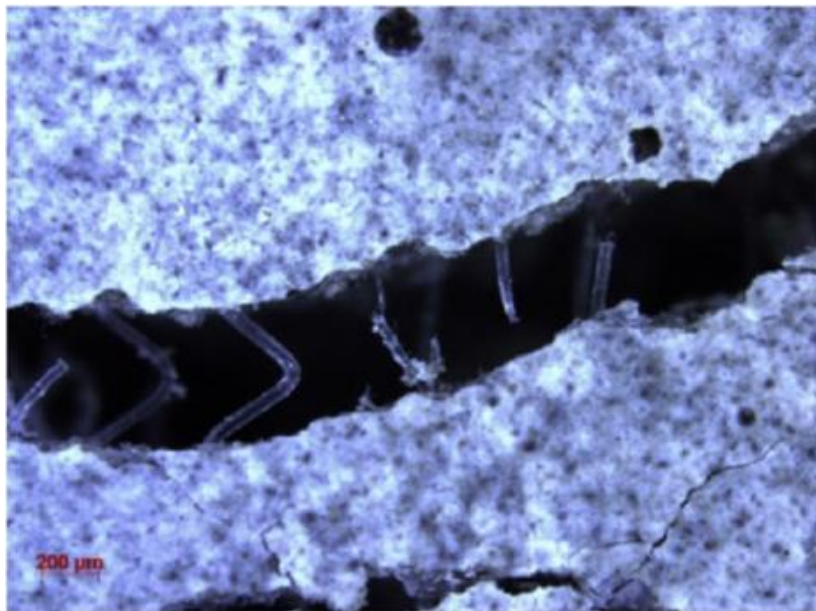


Figura 2.3 Fibras actuando como puente al interior de una muestra de hormigón [23].

Cada tipo de fibra posee propiedades mecánicas características y estas son comparables cuantitativa y cualitativamente con otras (Tabla 2.1). A pesar de esto, dichas comparativas no se reflejan directamente en hormigones fibroreforzados, es decir, una fibra puede poseer mayor resistencia a la tracción o mayor ductilidad, entre otras propiedades, pero esto no necesariamente implicará que las propiedades de compuestos reforzados con dicha fibra sean superiores. No solo eso, sino que además, pese a que la fibra es cada vez más utilizada, no existen suficientes estudios como para realizar un listado especificando cual es mejor como refuerzo para el hormigón. Otro factor importante, es el hecho de que aspectos como: la relación entre el largo y el diámetro, el tamaño y la forma, además del material, también influyen en el rendimiento del FRC, lo cual agrega más variables y dificulta, aún más, una comparación precisa. Lo que se puede llevar a cabo, en cambio, es la caracterización del hormigón reforzado con diferentes tipos de fibra de manera de poder tener una idea general de cuando y como utilizar cada una. Al haber sido las de acero las primeras industrializadas, son justamente de las de este material de las que más información se tiene. Esto lleva a la necesidad de investigar que sucede con fibras de otros materiales menos reconocidos, como por ejemplo, el alcohol de polivinilo o PVA.

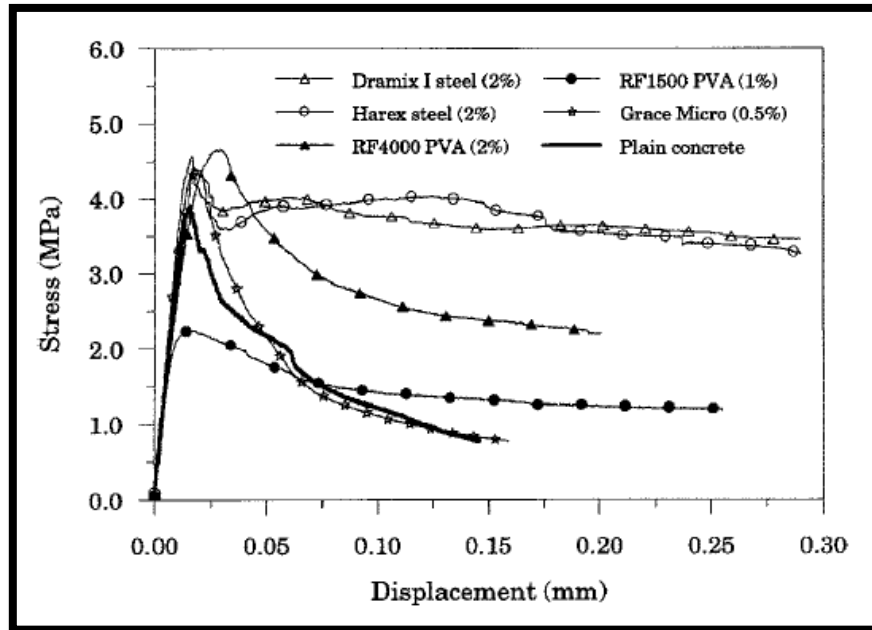
Tabla 2.1 Propiedades típicas de las fibras [18].

<b>Tipo de fibra</b>	<b>Resistencia a la tracción (Mpa)</b>	<b>Módulo de Young (10<sup>3</sup>Mpa)</b>	<b>Deformación última (%)</b>
Acero	280-2760	2	25-45
Acrílico	210-410	80-140	~0,6
Algodón	410-690	5	3-10
Asbesto	550-970	70	1,5-3,5
Lana de roca	480-760	4	16-20
Nylon	760-830	8	11-13
Poliéster	730-860	0,1-0,4	~10
Polietileno	~690	4	~25
Polipropileno	550-690	7	10-25
Seda artificial	420-620	70-120	~0,6
Vidrio	1040-3800	200	0,5-35

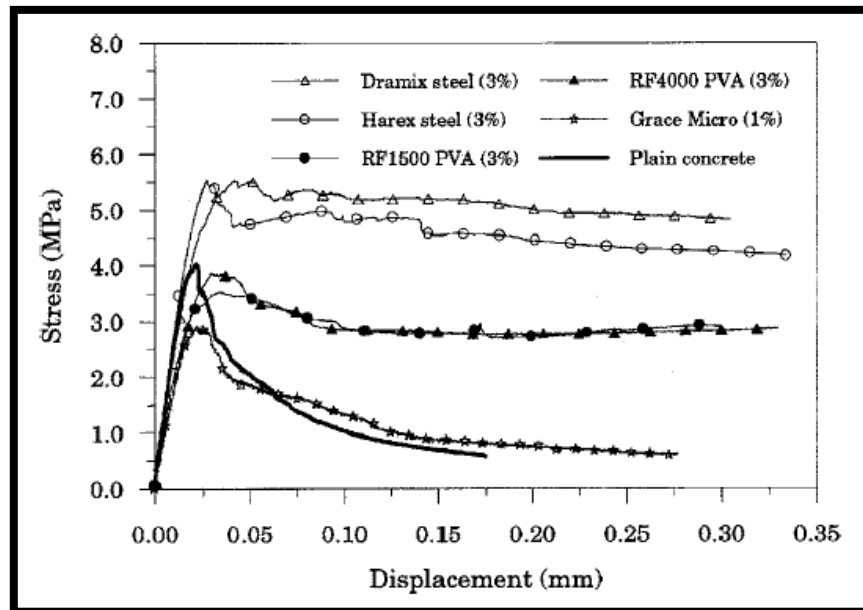
## 2.3 PVA en hormigón y mezclas similares

Las fibras de PVA corresponden a un tipo de fibra resistente y con alto módulo de elasticidad. Además de esto, poseen resistencia a la alcalinidad, factor que influye fuertemente en la capacidad del hormigón. Adicionalmente, dada su naturaleza hidrofílica, tiene la cualidad de generar fuertes enlaces químicos con matrices de cemento en presencia de agua. No solo eso, sino que en materiales con matrices de este tipo, se genera un efecto de fricción interfacial. Incluso, se puede mencionar que estas no causan daño al medio ambiente. Dadas estas características, el PVA se ha vuelto un material cada vez más estudiado y utilizado. En comparación con otras fibras como las de acero, estas son más económicas (para una misma cantidad volumétrica) [23]. No obstante, a través de los años se ha considerado que las fibras de acero, en lo que respecta a resistencia del hormigón, son superiores. Esto debido a las propiedades ya previamente estudiadas del acero como material. Por esta misma razón se ha experimentado más con este tipo de fibra, dejando el estudio del PVA en segundo plano, al menos hasta hace unas pocas décadas. Lo que es más, el PVA se ha estudiado mayoritariamente en lo que se conoce como “ECC” (por sus siglas en inglés: Engineered Cementitious Composites) correspondiente a mezclas similares al hormigón pero diseñadas con adiciones, o a veces incluso aditivos, de tal manera de ser superiores en uno o más aspectos a un hormigón tradicional. Dentro de este mismo tipo de peculiares mezclas, ECC, se han considerado las fibras de PVA como un implemento que puede potenciar aún más las propiedades de estos materiales cementicios. Esto mismo lleva a la conclusión de que es sumamente interesante estudiar este tipo de fibras en hormigones convencionales.

Como base para la investigación que cubre este documento, existen antecedentes respecto a estudios previos que se han realizado tanto en ECC como en hormigones y morteros tradicionales, reforzados con fibra de PVA. En uno de estos estudios, por ejemplo, llevado a cabo con ECC con humo de sílice y aditivo superplastificante, se ensayaron a tracción muestras con diversos tipos de fibras y diferentes volúmenes de estas. Entre estas fibras se encontraban las de PVA, en dos formatos, uno más largo que el otro. Como se mencionaba anteriormente, de este estudio se llegó a la conclusión de que con lo que respecta a resistencias, las fibras de acero son superiores. Sin embargo, se pudo observar que dependiendo de qué fibra de PVA se ocupara y en qué cantidad, se podía llegar a obtener una resistencia máxima similar o incluso superior a aquellos casos sin fibra. Lo que es más, era posible apreciar un cierto aumento en la ductilidad de las probetas. Todo esto, significando que el tamaño o, inclusive, la relación de aspecto de la fibra y el volumen utilizado influían en el rendimiento de un hormigón fibroreforzado, a tracción. Un detalle, no menor, que se pudo apreciar al final del estudio, fue que en ciertos casos, como lo fue en el de la fibra de PVA de menor tamaño, se producía un problema de conglomeración, impidiendo así una buena distribución de la fibra (y por ende, teniendo peores resultados). De esto se puede inferir que existen parámetros cuantitativos y cualitativos óptimos en lo que respecta a la adición de fibra de PVA al hormigón [16].



(a)



(b)

Figura 2.4 (a) y (b) Curvas tensión-desplazamiento de ECC a tracción con diferentes tipos de fibra y porcentajes [16].

Por otro lado, con lo que respecta a compresión, existe un estudio de hormigón y mortero, sin y con fibra de PVA (volúmenes de 1% y 2% con respecto al volumen total), en el que utilizando una relación agua/cemento equivalente a 50% se pudo llegar a la conclusión de que, en hormigones a 28 días, la resistencia máxima a compresión al incluir fibra es igual o un poco menor que aquella sin fibra. En el documento que resume la experiencia los autores dilucidan que el factor responsable de que en algunos casos disminuya la resistencia a compresión son los vacíos que genera la misma inclusión de la fibra (Figura 2.5). Por otro lado, los resultados revelaron que en los casos fibroreforzados, la curva esfuerzo-deformación presenta una abrupta caída tras llegar a su máximo, tal como se observa en la Figura 2.6 [11].

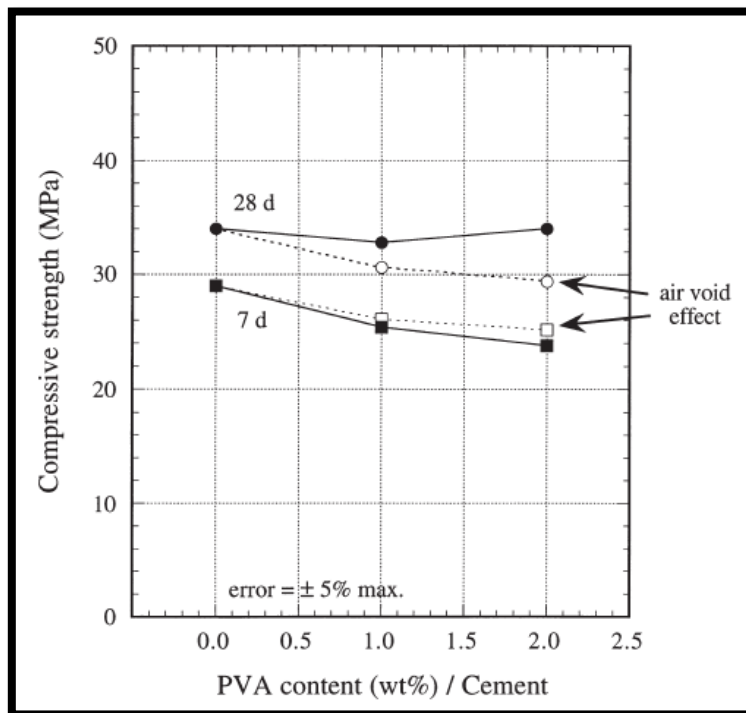
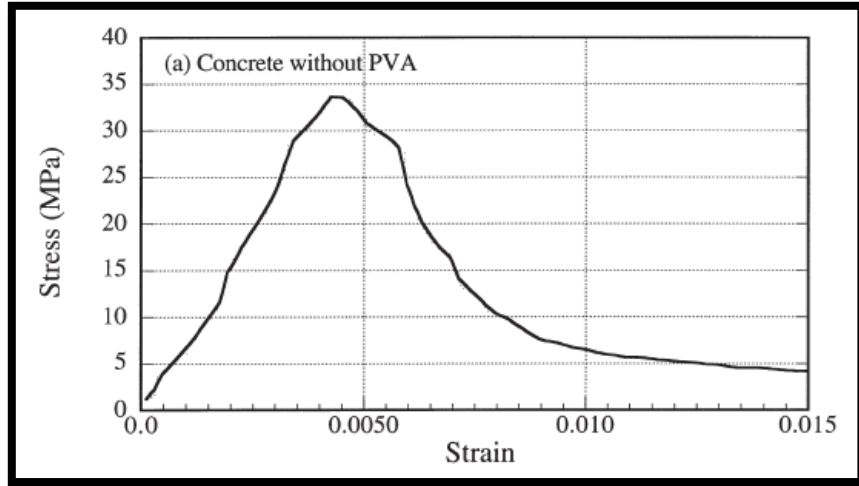
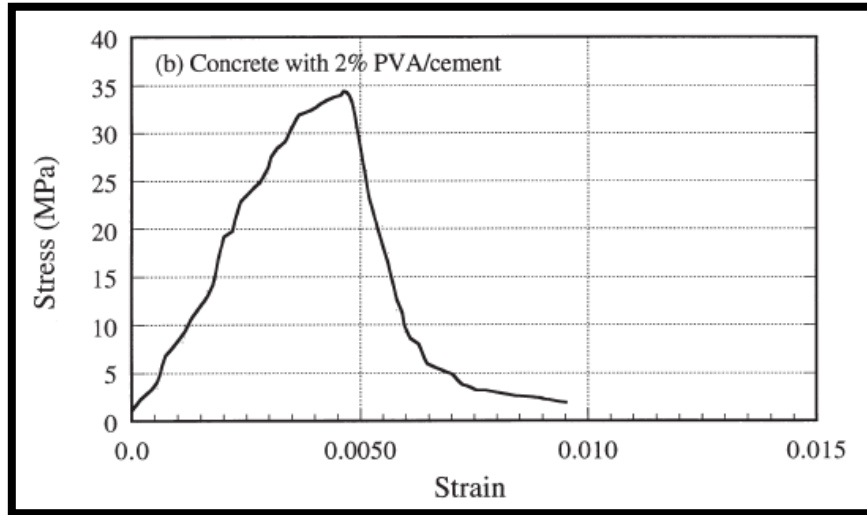


Figura 2.5 Relación entre resistencia a la compresión y cantidad de PVA (puntos blancos corresponden a mezclado común) [11].



(a)



(b)

Figura 2.6 (a) y (b) Curvas esfuerzo-deformación a compresión (a) sin y (b) con PVA [11].

Adicional al comportamiento a compresión y a tracción, de la literatura es posible rescatar cuales son los factores que más afectan a la efectividad de la fibra al ser incorporada en un elemento de hormigón. A continuación se presentan algunos de estos factores junto con otros aspectos importantes que se han descubierto en diversos estudios a través de los años.

### **Cantidad de fricción interfacial**

Un tipo de investigación interesante que se ha realizado con fibras de PVA es aquel a nivel micro, más específicamente, el estudio micromecánico. Mediante este tipo de estudio, se ha podido analizar la relación entre el efecto de fricción interfacial y la disipación de energía que otorga este tipo de fibras. Con estimaciones y cálculos, un poco más complejos de lo que abarca esta memoria, se puede llegar a la conclusión de que no se está aprovechando todo el potencial de la fibra, debido específicamente, al exceso de fricción existente entre el PVA y las matrices cementicias. Lo que es más, existe un tipo de ensayo denominado en inglés como “pull-out” (ensayo de extracción) que consta de extraer con un equipo una fibra inserta en una muestra de hormigón o algún otro material semejante [14]. Con este tipo de ensayo se confirma lo que dice la teoría, es decir, a diferencia de lo que se podría pensar, que el PVA genere tan fuertes enlaces con la matriz del hormigón puede llevar a peores resultados de lo esperado, ya que la fricción interfacial genera que, al ser cargado el elemento de hormigón, la fibra se rompa al estirarse llegando a la ruptura rápidamente. Esto ocurre sin aprovechar su elasticidad y capacidad de disipar energía de manera óptima. De esto mismo nace la idea de aplicar una capa de aceite a la fibra, de manera tal que deslice una cierta cantidad antes de empezar a prolongarse y evitar que la ruptura sea tan abrupta [21, 7]. Sin embargo, esta técnica, si bien se ha utilizado en otros estudios, hay poca información de cómo aplicarla y encontrar una fibra ya cubierta de aceite en el mercado no es simple.

### **Porcentaje de fibra y relaciones agua/cemento, árido/cemento y largo/diámetro**

Existen estudios, también, en los que directamente se afirma que para cada tipo de fibra hay una dosificación óptima. No solo eso, sino que además de influir el porcentaje de fibra utilizado (mencionado anteriormente y representado en la Figura 2.4 (a) y (b)), existe relación entre el rendimiento del elemento fibroreforzado y las relaciones agua/cemento y árido/cemento, tal como se presenta en la Figura 2.7. Se podría llegar a decir, incluso, que la relación óptima de agua/cemento en un hormigón reforzado con PVA, se encuentra vinculado al largo de la fibra que se usará [23, 4, 20]. Lo que es más, Li, en su estudio afirma que el porcentaje óptimo de PVA en ECC se encuentra alrededor del 2% (con respecto al volumen total de la mezcla) [13].



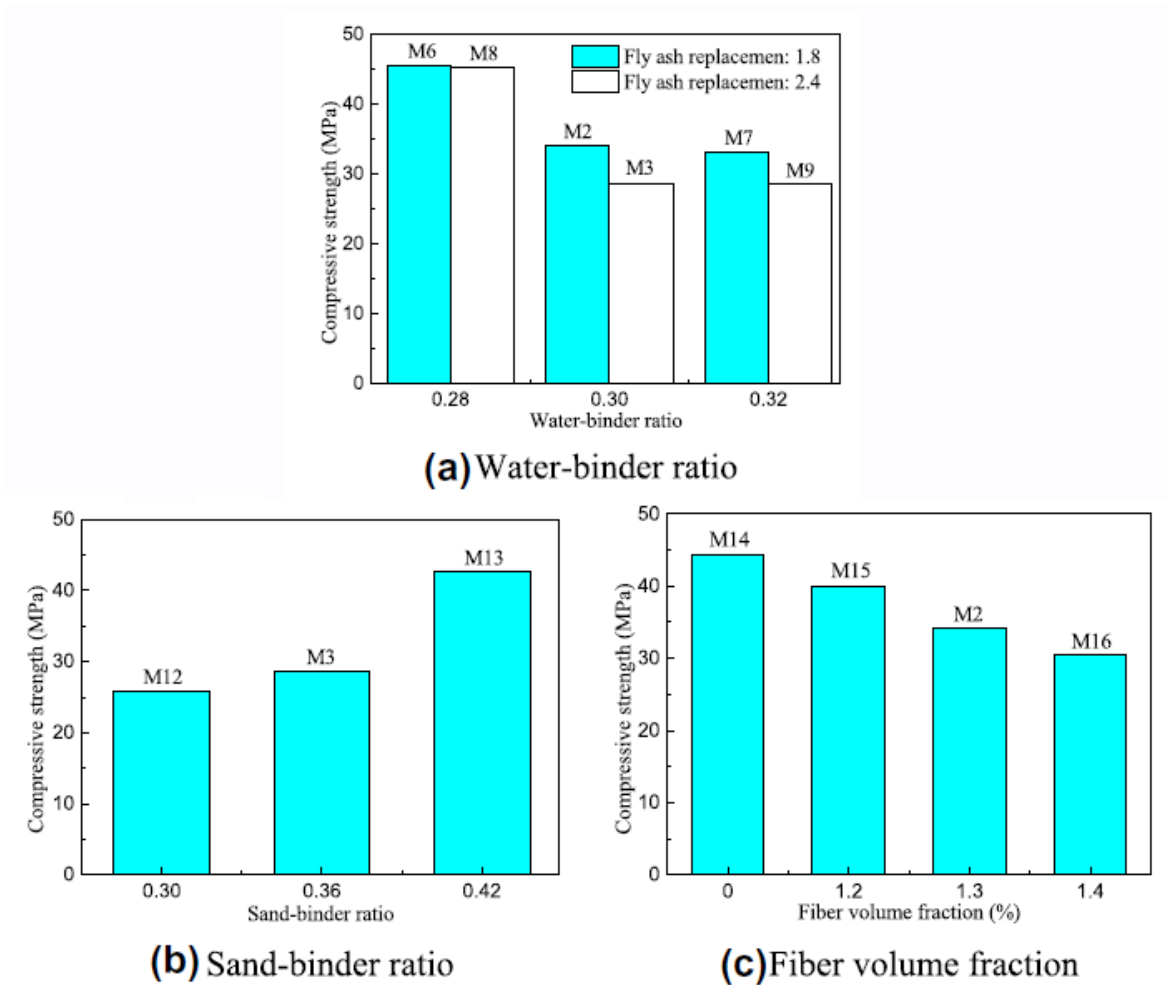


Figura 2.7 Efecto de relaciones agua/cemento (a), arena/cemento (b) y porcentaje volumétrico de fibra (c) en la resistencia a compresión de ECC con PVA [20].

### Orientación y distribución de las fibras

Hay estudios que, no solo enfatizan la importancia de la composición y proporción de materiales en la mezcla para obtener un buen comportamiento en un hormigón o ECC reforzado con fibra, sino que además factores como el equipo de mezclado que se utiliza o hasta la experiencia de quien elabora la mezcla puede influir fuertemente en el rendimiento siendo también otros factores importantes la orientación y distribución de la fibra, ya que estas definen si el PVA trabajará en conjunto al momento de realizar el efecto “puente” o, por el contrario, de manera independiente. [13, 6].

## Tamaño máximo de árido

Desde otro punto de vista, ciertos estudios implican que altos porcentajes de fibra de PVA (superiores al 4%) pueden entregar una mejora considerable en cuanto a ductilidad incluso llegándose a conseguir lo que se conoce como el efecto “strain-hardening” (fenómeno en el cual, tras llegarse a un aparente máximo de resistencia, al incrementarse la deformación aumenta incluso un poco más la resistencia, superándose la resistencia máxima inicial esperada). No obstante, dichos porcentajes implican problemas tales como: disminución brusca en la trabajabilidad, aglomeración excesiva de partículas y dificultad de mezclado. La trabajabilidad es una característica a considerar no menor tomando en cuenta que ya de por sí la inclusión de fibra implica una disminución de esta propiedad. A su vez, se sugiere que el tamaño máximo de árido utilizado influye en el rendimiento que tendrá un hormigón reforzado con PVA y que debido a los vacíos y la adhesión, es aconsejable que el tamaño de los áridos sea lo más bajo posible, tal como se presenta en la Figura 2.8 [22, 1, 10]. Ya que los estudios que se realizan suelen ser aplicados a ECC (los cuales de por sí siempre poseen áridos pequeños) en los estudios previamente mencionados se menciona que el PVA trabaja bien en matrices cementicias sin mucha, o nula, presencia de áridos grandes dada la mala interacción entre fibra y elementos de más de cierto tamaño al interior de una mezcla. Lo que es más, para obtener el efecto “strain-hardening” mencionado anteriormente, los factores base suelen ser altas: cantidades de fibra, tamaño máximo de árido menor a 1 milímetro y alguno que otro aditivo o adición específico según sea el caso.

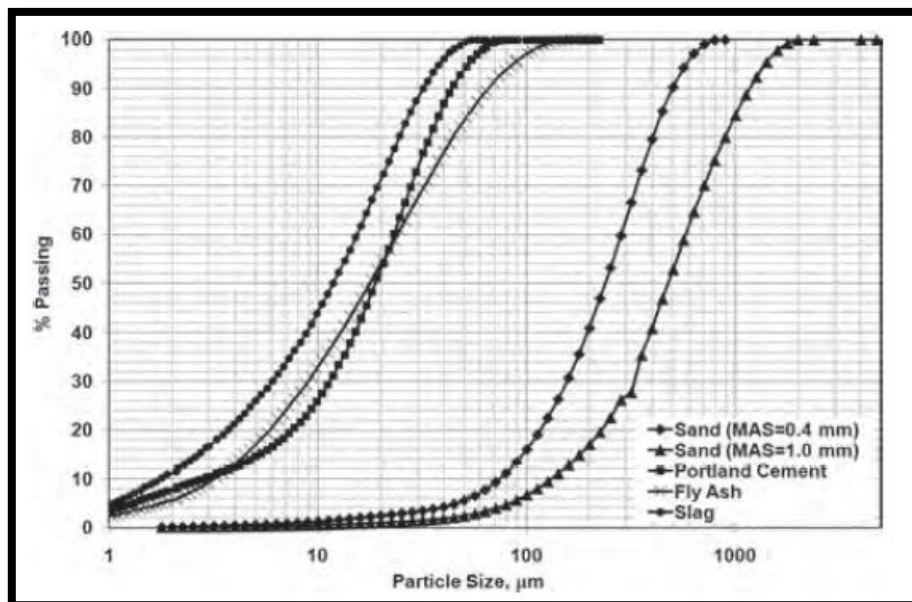


Figura 2.8 Tipo de granulometría usualmente empleada en probetas de ECC con PVA para mejor rendimiento [22].

Considerando la información que se ha podido conseguir mediante los estudios plasmados en la literatura, parece de sumo interés realizar investigaciones en hormigones tradicionales (no ECC) dado que la gran mayoría de los hormigones reforzados con PVA suelen ser, en realidad, morteros o compuestos cementantes con adiciones y aditivos, no necesariamente utilizados cotidianamente en las obras. De igual forma, no deja de ser importante realizar esta investigación variando los factores relevantes antes mencionados, para ver cómo estos afectan las propiedades de la mezcla. No obstante, dado que algunos de estos factores son difíciles de manipular o no se poseen los elementos necesarios, la experimentación se llevará a cabo concentrándose principalmente en la manipulación del porcentaje de fibra, de las cantidades de cemento, agua y áridos empleados (teniendo presente las relaciones entre dichas magnitudes) y el tamaño máximo de los áridos de cada mezcla. En los siguientes capítulos se alude a toda la sección experimental de esta investigación, presentándose las mezclas con las diferentes configuraciones que se obtienen de ir variando los factores a los que se hace referencia en este capítulo.

## Capítulo 3

# Programa experimental y resultados

La parte experimental de esta investigación consistió, principalmente, en tres etapas. Una primera, preliminar, en donde se utilizó premezclado para elaborar las probetas, una segunda fase para probar y elegir la dosificación que tendrían las probetas finales y una tercera y última con las probetas definitivas de las cuales saldrían los resultados más relevantes. En este capítulo se presenta como fue llevada a cabo cada etapa y los resultados de cada una.

### 3.1 Etapa preliminar

El propósito de esta primera etapa era obtener resultados preliminares que pudieran entregar una primera aproximación a una tendencia general del comportamiento de hormigón tradicional, al ser este reforzado con microfibras de PVA, en contraste con un hormigón de igual dosificación pero sin ningún tipo de refuerzo. La idea detrás de esta fase consistía en evaluar el efecto de la incorporación del PVA tomando en cuenta la importancia que le daba la literatura al tamaño máximo del árido, intentando mantener las proporciones tanto agua/cemento como árido/cemento y además utilizar esta primera instancia como método de ensayo para no cometer errores con las probetas finales a la hora de fabricar y ensayar hormigones fibroreforzados. Para ello, buscando simplificar el comienzo de esta etapa, se utilizaron sacos premezclados de cemento y áridos, evitando así la elaboración de las mezcla desde cero. Dado que el tamaño máximo de los áridos en estos sacos era demasiado alto para lo que se buscaba, el primer paso fue realizar una granulometría, de modo de poder elegir dos tamaños máximos de árido objetivo

Para llevar a cabo la granulometría se debió emplear tamices ASTM (Figura 3.1) con diferentes aperturas y balanzas. A través de este método, es posible obtener un gráfico que representa el porcentaje de cada tamaño de los áridos contenidos en una muestra representativa de mezcla. Con la granulometría lista, se decidió cuáles serían los tamaños de árido máximo y las cantidades de fibra y proporciones agua/cemento y árido/cemento (Tabla 3.3). Esto dio inicio a un proceso de tamizado para eliminar toda partícula con tamaño superior al buscado.



Figura 3.1 Tamices ASTM.

Finalizado el tamizado, se procedió a elaborar los moldes que se utilizarían para las probetas (Figura 3.2). Dichos moldes consistían en tuberías de PVC de 21 centímetros de largo y con una abertura de 10,5 centímetros de diámetro, tapados solo en su extremo inferior, por una tapa del mismo material y sellados con silicona. Estos moldes, tras ser rellenos con hormigón fresco, debían ser envueltos con plástico para evitar que factores externos interfirieran con el fraguado. Las propiedades de los materiales empleados en la elaboración de las probetas se pueden apreciar en la Tabla 3.1 y 3.2, mientras que la granulometría de la mezcla preparada Topex se encuentra en la Figura 3.3.



Figura 3.2 Moldes de PVC sellados con silicona.

Tabla 3.1 Propiedades de cemento en premezclado Topex empleado en probetas preliminares estimadas con [17].

<b>Cemento Topex</b>	
Puzolana (%)	25
SiO <sub>2</sub> (%)	32,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	7,9
CaO (%)	47,5
SO <sub>3</sub> (%)	2,7
Peso específico (gr/dm <sup>3</sup> )	2,85

Tabla 3.2 Propiedades de fibras de PVA empleadas en probetas preliminares y finales.

<b>Fibras PVA</b>	
D (mm)	0,15
L (mm)	12
E (GPa)	20
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	1,19

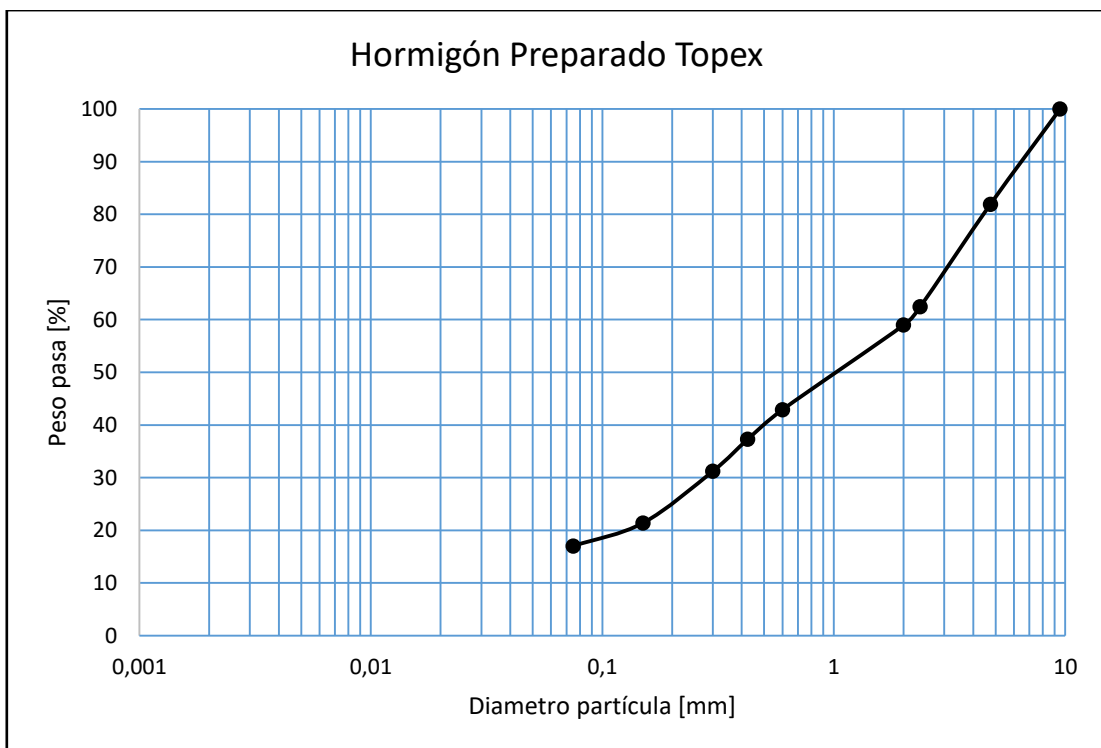


Figura 3.3 Granulometría de premezclado Topex.

Tabla 3.3 Mezclas preliminares.

Mezcla	Dmax (mm)	Vf (%)	W/C	Ar/C
MP_A2.36_F0	2,36	0	0,59	2,66
MP_A2.36_F2.5	2,36	2,5	0,59	2,66
MP_A0.425_F0	0,425	0	0,79	2,66
MP_A0.425_F2.5	0,425	2,5	0,79	2,66

MP: Mezcla Preliminar, AX: Tamaño máximo de árido X, FY: Volumen de fibra Y.

Con los moldes listos y las mezclas ya tamizadas, el siguiente paso constaba de la elaboración de las probetas. Para el mezclado del cemento y los áridos con el agua se utilizó una betonera con una capacidad de 150 litros, con un motor de 1.5 HP y de 2750 rpm (Figura 3.4). Primero se rociaba el interior de la betonera con agua (dado que parte del agua, durante la mezcla, se evapora y si no está bien lubricado el tambor, el mezclado no se produce correctamente) y luego se colocaba el premezclado de cemento y áridos, seguido del agua (en casos en los que hubiese que agregar PVA, este se introducía antes del agua). Todo esto considerando un factor de pérdida de al menos 20% de material, tomando en cuenta evaporación y restos pegados inalcanzables al interior de la betonera. En aquellas mezclas con mayor tamaño máximo de árido se debió agregar un poco más de premezclado, debido a que el exceso de agua que parecía haber (al interior de la betonera) podría causar problemas de resistencia en las probetas. Por el contrario, en las mezclas con menor tamaño máximo de árido, se debió agregar agua debido a que la cantidad no parecía ser suficiente para que el cemento reaccionara. Estos ajustes finales son la razón de porque en la Tabla 3.3, en donde se presentan las mezclas preliminares y sus dosificaciones, las relaciones agua cemento son diferentes pese a que el objetivo original era que fuesen iguales.

Transcurrido un tiempo, para el cual ya se apreciaba que la mezcla era lo suficientemente homogénea, el hormigón fresco se sacaba y colocaba directamente en los moldes (que ya contenían desmoldante en su interior) correspondientes, envolviéndose estos posteriormente con plástico. Esta rutina se repitió para cada una de las cuatro mezclas presentadas en la Tabla 3.3. Es importante mencionar que, previo a la envoltura del molde, se debía compactar adecuadamente el hormigón al interior del tubo siguiendo la norma NCh1017 [8]. Para esto se optó por compactación mayoritariamente por apisonamiento. Esto se realizó colocando el hormigón en tres capas, apisonando con una varilla de acero, golpeando más de 7 veces en toda la sección y procurando atravesar cada capa por completo, incluso penetrando una cierta cantidad de la capa inferior (a excepción de la primera capa). Adicionalmente, tras la compactación de cada capa, se golpearon suavemente los costados del molde para cerrar los vacíos dejados por la varilla. La Figura 3.5 presenta las probetas en sus moldes, envueltos, en proceso de fraguado. Tres meses transcurrieron desde la fabricación del hormigón hasta el inicio de los preparativos para ensayar las probetas cilíndricas.



Figura 3.4 Betonera utilizada en la elaboración de las probetas.



Figura 3.5 Curado del hormigón.

Los ensayos a realizar correspondían a compresión y tracción directa utilizando una máquina universal Instron® modelo 600LX. Lo primero fue desmoldar las probetas, quitando el plástico, destapando la tubería y cortando cuidadosamente el PVC con una sierra. En el caso de las probetas destinadas a compresión, se debió refrentar de modo tal de que ambas caras del cilindro fuesen paralelas. Para esto, se usó el adhesivo epóxico Sikadur® 31 HMG (Figura 3.6).





Figura 3.6 Sikadur y superficie de probeta pre y post refrentado.

Por otro lado, para aquellas probetas que serían ensayadas a tracción se requirió el uso de placas circulares de acero con una placa rectangular soldada en su centro (Figura 3.7). Esto debido a que las mordazas del equipo no poseían las dimensiones necesarias para sostener los cilindros y a su vez, porque incluso de poderse ensayar directamente esto generaría fricción y abrasión innecesaria. Para fijar las placas a las probetas se ocupó el mismo adhesivo que aquel utilizado en aquellas a compresión.



Figura 3.7 Placas de acero utilizadas para probetas destinadas a tracción.

Los ensayos uniaxiales fueron realizados con las velocidades presentadas en la Tabla 3.4. Adicionalmente, para poder evaluar de mejor manera la deformación unitaria de los cilindros, en cada probeta se fijó un par de anillos cuya finalidad era sostener los LVDT (sensores de desplazamientos) con los que se obtendrían datos más precisos que los que se pueden llegar a obtener con el equipo universal en sí.



Figura 3.8 Probetas montadas listas para ser ensayadas a compresión (izq.) y tracción (der.) con anillos y LVDTs a los costados.

Para esta primera etapa preliminar solo se consideró una probeta a compresión y una a tracción para cada mezcla. Con los ensayos realizados (montados como se muestra en la Figura 3.8) se llegó a la conclusión de que una sola muestra para cada tipo de ensayo y mezcla no sería suficiente para la etapa final, ya que esto podría llevar a generar problemas con los resultados, tanto desde el punto de vista de pérdida de un dato (por ensayo fallido o probeta mal elaborada) como por la dispersión presente en testeos con hormigón. Por lo que se determinó que en la fase final sería necesario tener al menos dos de cada una, finalizando así esta primera fracción de la parte experimental de esta investigación.

Tabla 3.4 Velocidades de los ensayos

Tipo de ensayo	Velocidad (mm/min)
Compresión sin fibra	0,5
Compresión con fibra	1
Tracción sin fibra	0,2
Tracción con fibra	1

Con los resultados de esta primera etapa se elaboraron los gráficos presentados a continuación (Figura 3.9 y Figura 3.10). Estos representan el comportamiento de cada probeta ante la compresión y la tracción, respectivamente, en base a la tensión que soportaban en función de las deformaciones unitarias a las que se veían sometidas. Cada mezcla se comportó de manera diferente alcanzando tensiones máximas, deformaciones unitarias asociadas a dichas tensiones máximas y módulos de elasticidad distintos. Para facilitar la comparación, se enlistan en las Tablas 3.5 y 3.6 los valores mencionados previamente para cada una de las mezclas.

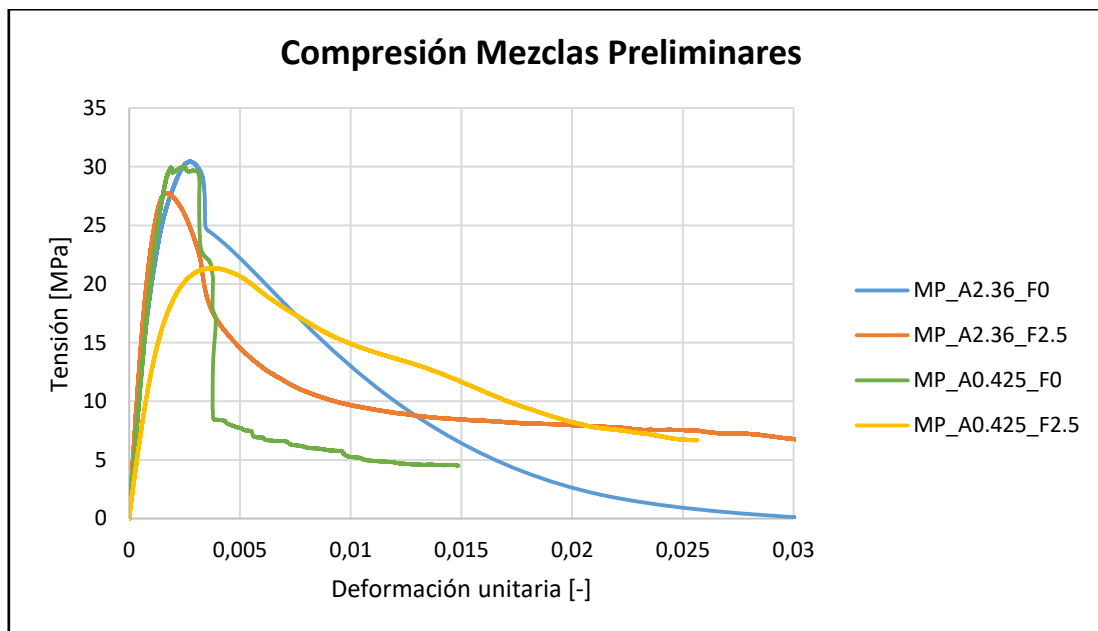


Figura 3.9 Gráficos de compresión para tanga de mezclas preliminares.

Tabla 3.5 Resultados mezclas preliminares a compresión.

Mezcla	F'c (MPa)	eo	E (MPa)
MP_A2.36_F0	30,41	0,0028	25918
MP_A2.36_F2.5	27,2	0,0021	24512
MP_A0.425_F0	29,83	0,0022	25670
MP_A0.425_F2.5	21,22	0,0043	21651

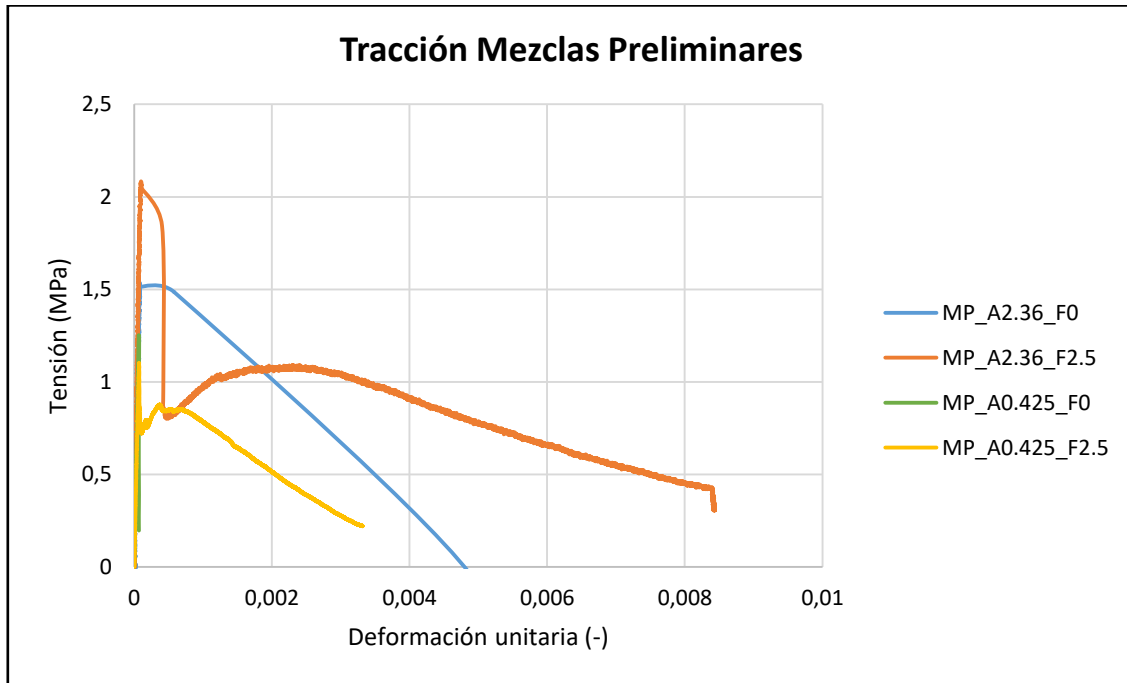


Figura 3.10 Gráficos de tracción para tunda de mezclas preliminares.

Tabla 3.6 Resultados mezclas preliminares a tracción.

Mezcla	F't (MPa)	eo	E (MPa)
MP_A2.36_F0	1,53	0,000085	18000
MP_A2.36_F2.5	2,08	0,000089	23370
MP_A0.425_F0	1,24	0,000072	17222
MP_A0.425_F2.5	1,1	0,000069	15942

## 3.2 Selección de dosificación

Con los resultados preliminares se tomó la decisión de que, para las probetas definitivas, sería necesario elaborar la mezcla completa (sin sacos de material premezclado), lo que supondría realizar todas las estimaciones de dosificación. Esto significaría, primero, obtener los materiales y en base a estos y sus propiedades, calcular proporcionalmente cuanto se requeriría de cada uno para cada tamaño máximo de árido diferente. Se buscaba que todas las muestras sin fibra presentaran el mismo nivel de resistencia a compresión por lo que ese factor influyó en que fuese necesario, no solo cálculo, sino que además ensayos de probetas con el fin de comprobar que estas dosificaciones efectivamente entregaran un mismo  $f'c$ . El primer material obtenido fue el cemento cuyas propiedades se aprecian en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Propiedades cemento empleado en probetas de dosificación y finales estimadas con [17] y [19].

<b>Cemento Melón Especial</b>	
Puzolana (%)	30
SiO <sub>2</sub> (%)	34,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	8,3
CaO (%)	44,4
SO <sub>3</sub> (%)	2,4
Peso específico (gr/dm <sup>3</sup> )	2,82

Con el apoyo de IDIEM se obtuvieron los áridos que se utilizarían y algunas de sus propiedades, esenciales a la hora de calcular las dosificaciones, tales como la granulometría, las densidades, las humedades y las absorciones (Tabla 3.8 y Figuras 3.11-14). Considerando dichos parámetros y la calidad del cemento, se desarrolló un primer cálculo de las cantidades de cada material. Estas cantidades obtenidas fueron usadas para fabricar probetas, únicamente sin fibra, con el fin de intentar cumplir con el objetivo de esta fase. Por lo tanto, a 7 días de su elaboración, cada una de las 6 probetas (2 relaciones agua/cemento para cada tamaño máximo de árido, como se observa en la Tabla 3.9) fue ensayada a compresión. Sin embargo, tras obtenerse los resultados de estos ensayos se comprendió que serían necesarios más datos para comprobar que las dosificaciones seleccionadas cumplieran con lo que se buscaba, además de ser importante corroborar que los valores obtenidos fuesen correctos. Por lo mismo, se elaboró una segunda tanda de 6 probetas sin fibra (Tabla 3.10). Esta vez las relaciones agua/cemento se redujeron un poco, con el propósito de llegar a resistencias más altas y lo que es más, al observarse en la primera tanda que diferentes tamaños de árido implicaban que para una misma resistencia se requerían diferentes relaciones entre agua y cemento, en la segunda tanda, en vez de repetir las mismas magnitudes agua/cemento, se utilizó un valor para cada mezcla con el fin intentar obtener resistencia similares entre todas.

Tabla 3.8 Propiedades de áridos empleados en mezclas de dosificación y finales.

Propiedades	Gravilla 9,5	Arena 9,5	Arena 4,75	Arena 0,3
Densidad real SSS (kg/m <sup>3</sup> )	2744	2657	2631	2606
Absorción (%)	1,2	1,9	2,0	1,8
Humedad (%)	1,4	5,6	5,6	12

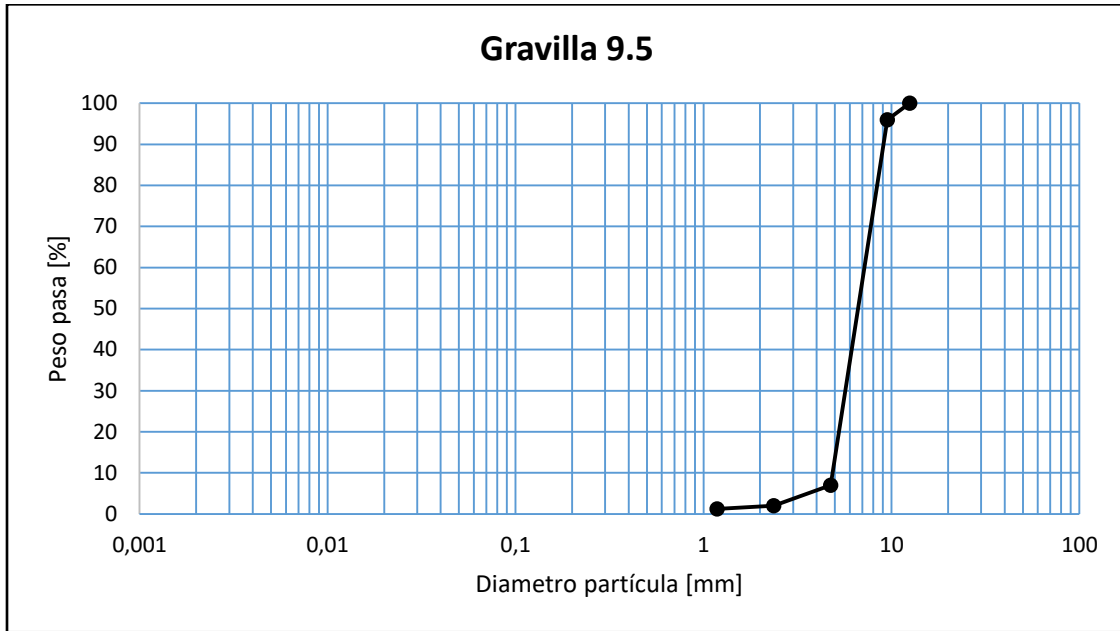


Figura 3.11 Granulometría Gravilla 9,5 mm.

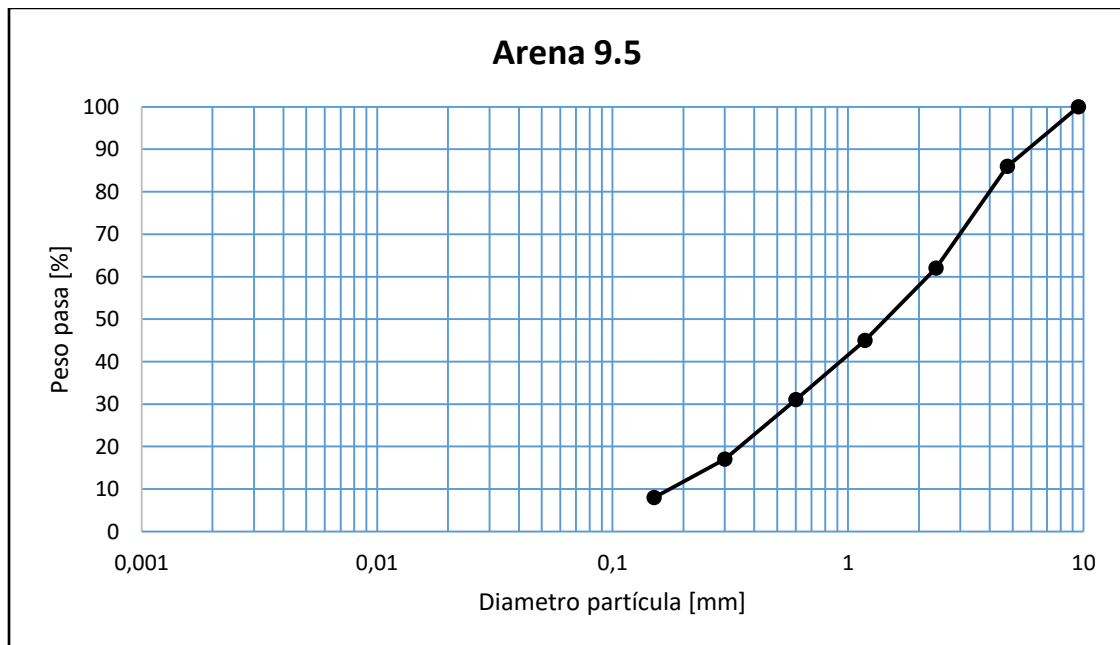


Figura 3.12 Granulometría Arena 9,5 mm.

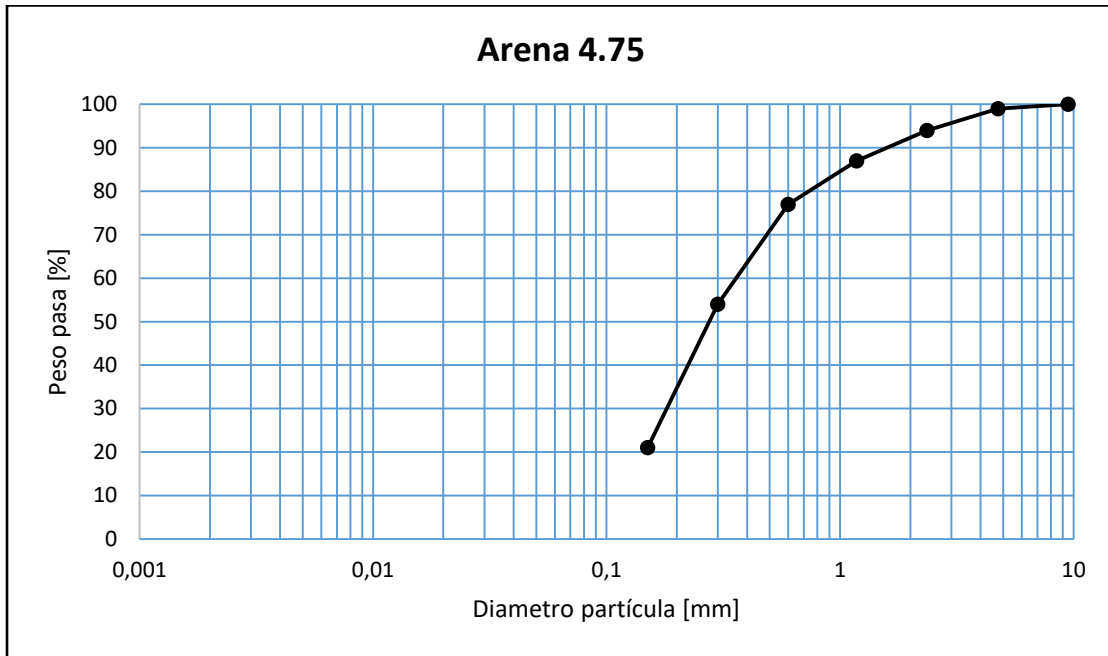


Figura 3.13 Granulometría Arena 4,75 mm.

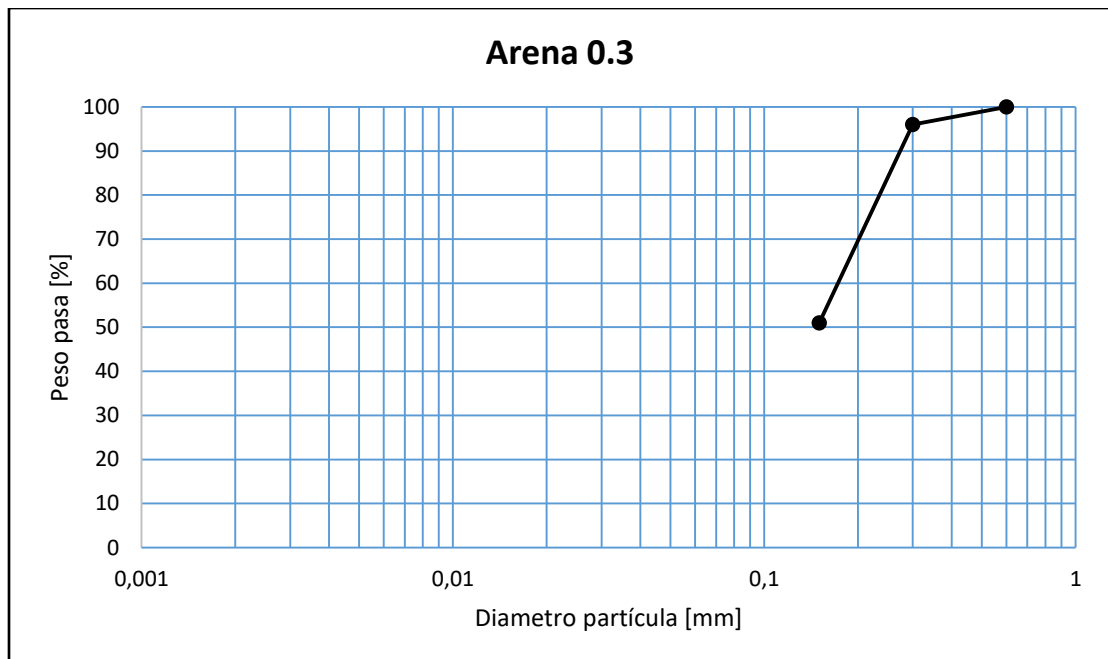


Figura 3.14 Granulometría Gravilla 0,3 mm.

Tabla 3.9 Primer lote de mezclas para definir dosificaciones finales.

Mezcla	Cemento	Agua	Gravilla	Arena	Arena	Arena	W/C*	Ar/C
	[kg]	[kg]	9,5 [kg]	9,5 [kg]	4,75 [kg]	0,3 [kg]		
MD1_A9.5_WC0.54	0,84	0,36	1,13	2,74	0	0	0,54	4,59
MD1_A9.5_WC0.6	0,84	0,41	1,09	2,65	0	0	0,6	4,43
MD1_A4.75_WC0.54	1,10	0,48	0	0	3,28	0	0,54	2,98
MD1_A4.75_WC0.6	1,10	0,55	0	0	3,09	0	0,6	2,81
MD1_A0.3_WC0.54	1,60	0,59	0	0	0	2,77	0,54	1,73
MD1_A0.3_WC0.6	1,60	0,70	0	0	0	2,54	0,6	1,59

MD1: Mezcla Dosificación 1, AX: Tamaño máximo de árido X, WCY: Relación agua/cemento Y. \*: ajustado con agua de áridos.

Tabla 3.10 Segundo lote de mezclas para definir dosificaciones finales.

Mezcla	Cemento	Agua	Gravilla	Arena	Arena	Arena	W/C*	Ar/C
	[kg]	[kg]	9,5 [kg]	9,5 [kg]	4,75 [kg]	0,3 [kg]		
MD2_A9.5_WC0.54	1,02	0,45	1,14	2,78	0	0	0,54	8,66
MD2_A9.5_WC0.57	0,97	0,45	1,16	2,81	0	0	0,57	8,78
MD2_A9.5_WC0.52	1,34	0,61	0	0	2,63	0	0,52	1,15
MD2_A9.5_WC0.55	1,26	0,61	0	0	2,70	0	0,55	1,15
MD2_A9.5_WC0.50	1,58	0,60	0	0	0	2,10	0,50	0,84
MD2_A9.5_WC0.51	1,56	0,60	0	0	0	2,12	0,51	0,85

MD2: Mezcla Dosificación 2, AX: Tamaño máximo de árido X, WCY: Relación agua/cemento Y. \*: ajustado con agua de áridos.

Con la correlación entre resistencia máxima a compresión y relación agua/cemento que se logró conseguir de los ensayos de ambas tandas de probetas (Figura 3.15), se pudo definir cuáles serían las dosificaciones definitivas.

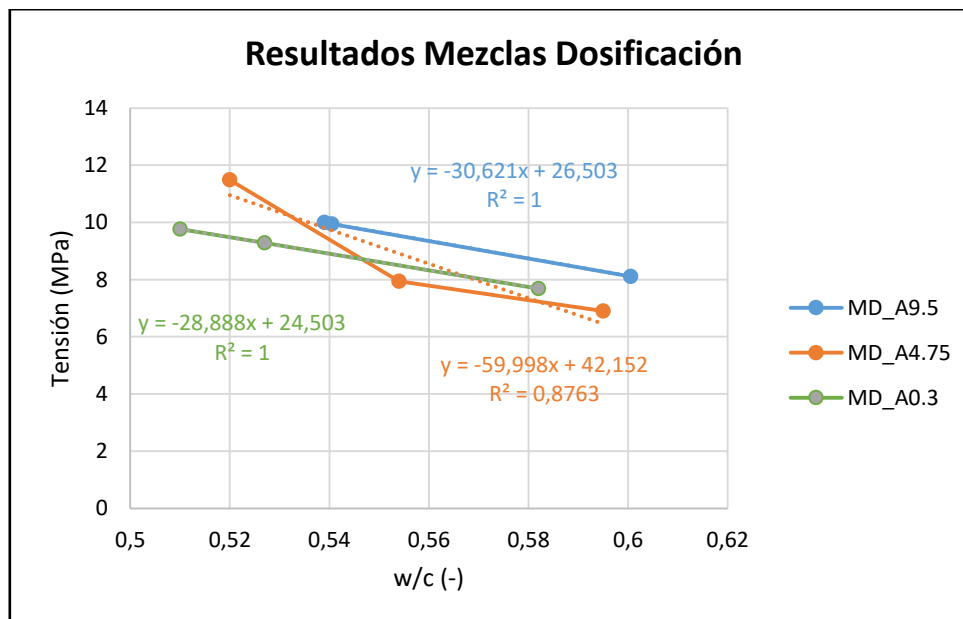


Figura 3.15 Regresiones obtenidas de mezclas de dosificación para relación entre tensión y w/c.



### 3.3 Probetas finales

Con lo obtenido en la etapa preliminar y con las dosificaciones ya seleccionadas en la etapa anterior, se dio inicio a la última parte de la experiencia experimental. De la misma manera que se consideró en la etapa de dosificación, para la elaboración de las probetas finales, se consideraron dos especímenes para cada tipo de ensayo (compresión y tracción) de cada mezcla. Esto con el objetivo de prevenir la pérdida de resultados valiosos en caso de que el ensayo de una probeta fallara. Otro punto importante que se debió anticipar, considerado gracias a la etapa preliminar, fue la cantidad de tiempo que requería pegar las placas de acero en el caso de las probetas a tracción. Para el caso de los primeros ensayos, el hecho de que fueran pocas muestras, significó que a pesar de ser un proceso demoroso, el tiempo de pegado no fuera tanto. Pero para este caso, al ser casi cinco veces mayor la matriz de ensayos, era completamente necesario acelerar el proceso. Para esto, se realizaron modificaciones a las placas, cambiando la placa perpendicular rectangular por una barra de 25 mm de diámetro (Figura 3.16). De esta manera no sería necesario dejar las placas adhiriéndose a la probeta en la máquina universal, sino que, se podría utilizar la máquina solo para un pegado y alineado inicial y luego sacar dicha probeta, dejarla en otro lugar fraguando y colocar la siguiente con su respectivo par de placas. Vale mencionar, que además de modificar las placas ya existentes, se solicitó la elaboración de más placas con la forma actualizada (con barras en vez de placas rectangulares).

Además de considerar las modificaciones para las placas de acero, de la etapa preliminar se observaron una serie de factores importantes que habría que tomar en cuenta para la fabricación de las probetas finales. Dentro de estas, se encontraba la absorción de agua por parte de los áridos. Si bien, en la etapa de dosificaciones se consideró este aspecto, en la primera tanda hubo problemas con las relaciones entre agua y cemento, lo que significó que de ese punto en adelante fuese muy importante poner especial énfasis en la cantidad de agua libre que realmente habría en la mezcla. Adicionalmente, en este punto, gracias a lo observado en la primera tanda de mezclas se optó por no volver a utilizar como método de vibrado el apisonado. Mediante la experiencia se aprendió que en lo posible, se debía apisonar lo menos posible la mezcla en el molde dado que esto podría significar un apelotonamiento de las fibras reduciendo la efectividad del aporte de estas a las propiedades del hormigón. Lo que es más, lo más eficiente en estos casos sería vibrar de manera externa, con golpes suaves, siempre considerando evitar dañar el molde o que el agua de la mezcla brotara a la superficie libre. Pese a que no se utilizó cono de Abrams en la etapa preliminar, existen documentos que confirman que en los casos con fibra, este dato no es de utilidad dado que la fibra, al alterar la trabajabilidad altera la representatividad del valor obtenido mediante este método. Por lo mismo, para el vibrado no se utilizaría cono, se realizaría poco apisonado y moderado vibrado externo. Considerando, por supuesto, obtener de todas formas una mezcla bien compactada.

Otro detalle importante que se tendría en cuenta al momento de fabricar las últimas probetas, sería el de realizar un pre mezclado de los materiales antes de introducirlos a la betonera dado que, por lo que se veía en ciertas mezclas realizadas previamente, al introducir uno a uno cada material ocurrían problemas de homogenización debido a que la betonera utilizada estaba diseñada para soportar hasta 150 litros. Esto significaba que, por cómo estaba ideada la betonera, para cargas pequeñas el peso del material introducido no era suficiente como para que este se mezclara de manera completa.

A continuación se presentan la Tabla 3.11 con las dosificaciones finales obtenidas en base a las etapas anteriores, tomando también en consideración los volúmenes de fibra que se seleccionaron finalmente:

Tabla 3.11 Mezclas finales.

Mezcla	Cemento	Agua	Gravilla	Arena	Arena	Arena	W/C*	Ar/C	Fibra	Vf
	[kg]	[kg]	9,5 [kg]	9,5 [kg]	4,75 [kg]	0,3 [kg]			[kg]	
MF_A9.5_F0	4,49	1,81	4,47	10,86	0	0	0,49	3,42	0	0%
MF_A9.5_F1	4,49	1,81	4,47	10,86	0	0	0,49	3,42	0,11	1%
MF_A9.5_F2	4,49	1,81	4,47	10,86	0	0	0,49	3,42	0,23	2%
MF_A4.75_F0	5,50	2,42	0	0	10,37	0	0,50	1,89	0	0%
MF_A4.75_F1	5,50	2,42	0	0	10,37	0	0,50	1,89	0,10	1%
MF_A4.75_F2	5,50	2,42	0	0	10,37	0	0,50	1,89	0,21	2%
MF_A0.3_F0	6,69	2,4	0	0	0	8,12	0,47	1,21	0	0%
MF_A0.3_F1	6,69	2,4	0	0	0	8,12	0,47	1,21	0,10	1%
MF_A0.3_F2	6,69	2,4	0	0	0	8,12	0,47	1,21	0,20	2%

MF: Mezcla Final, AX: Tamaño máximo de árido X, FY: Volumen de fibra Y. \*: ajustado con agua de áridos.

Fuera de las modificaciones a los procedimientos, que ya fueron mencionadas en los párrafos anteriores, el proceso de mezclado fue análogo al descrito en la sección de la etapa preliminar. La única diferencia siendo el número de mezclas que se elaboraron, mucho más alto y que, por lo mismo, se debieron preparar en dos días en vez de uno.



Figura 3.16 Placas de acero modificadas

Transcurridos los 28 días, se desmoldaron las probetas, pero dado que se deseaba dejar registro fotográfico para un futuro estudio de fotogrametría, cada probeta destinada a compresión y a tracción fue pintada con cal (para emblanquecer la superficie del hormigón) y con pintura negra, con un patrón aleatorio de puntos tal como se presenta en la Figura 3.17. Estos puntos serían necesarios para, en una investigación posterior, determinar las deformaciones de cada muestra de manera más precisa. Las fotografías se realizaron con una cámara en un punto fijo, conectada a un computador y de manera remota utilizando un programa, con intervalos de 5 segundos. Esto se llevaba a cabo al mismo tiempo que la máquina universal aplicaba carga a las probetas. Estas con el mismo montaje que todos los ensayos anteriores. Estos ensayos, al ser los últimos, finalizados dieron término a lo que sería la parte experimental de esta investigación, abriéndose paso así a la parte analítica.



Figura 3.17 Patrón de pintura para fotogrametría.

De igual manera que en la etapa preliminar, con los resultados obtenidos de los ensayos se elaboraron gráficos para poder comparar el comportamiento de las mezclas. Para este caso se realizaron 3 gráficos a compresión (Figuras 3.18-20) y 3 a tracción (Figuras A.1-3) agrupando las curvas por tamaño de árido, para poder observar el efecto de la incorporación de fibra al hormigón manteniendo como constante el árido. También se enlistaron en las Tablas 3.12-14 los valores más relevantes (a compresión) para poder apreciar las diferencias de magnitudes con mayor facilidad.

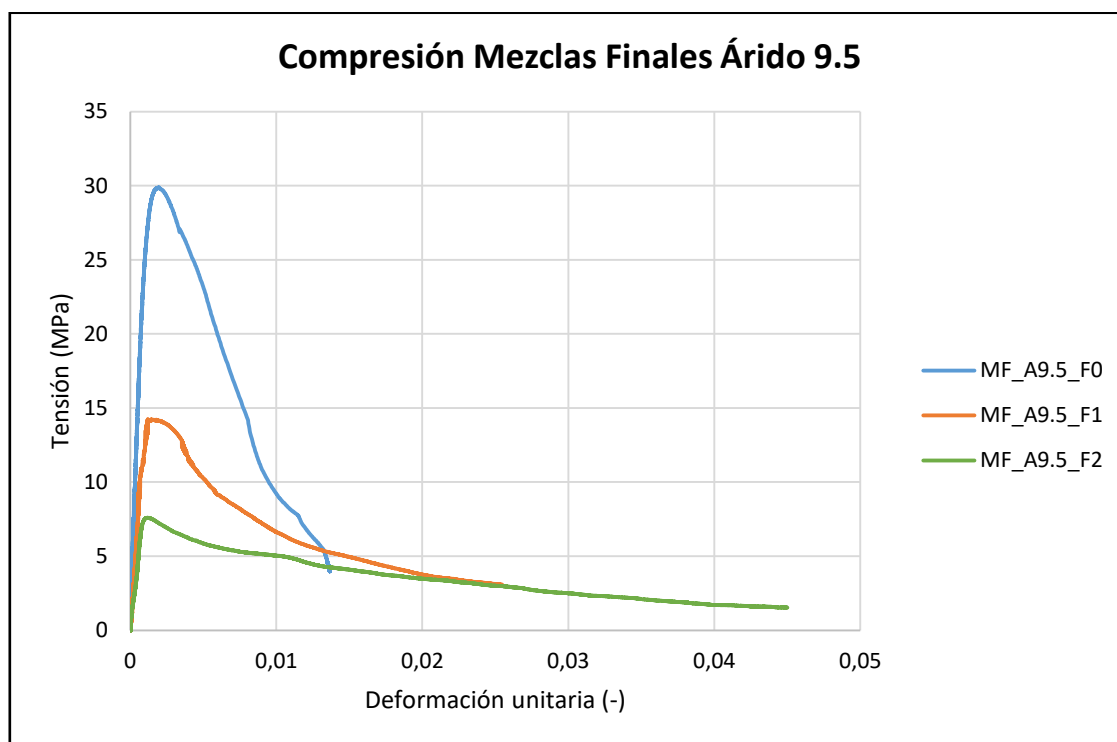


Figura 3.18 Gráficos de compresión para probetas con Dmax 9,5 mm de las mezclas finales.

Tabla 3.12 Resultados mezclas finales Dmax 9,5 mm a compresión.

Mezcla	F <sup>'</sup> c (MPa)	eo	E (MPa)
MF_A9.5_F0	29,9	0,002	25700
MF_A9.5_F1	14,24	0,0012	17736
MF_A9.5_F2	7,6	0,0012	12957

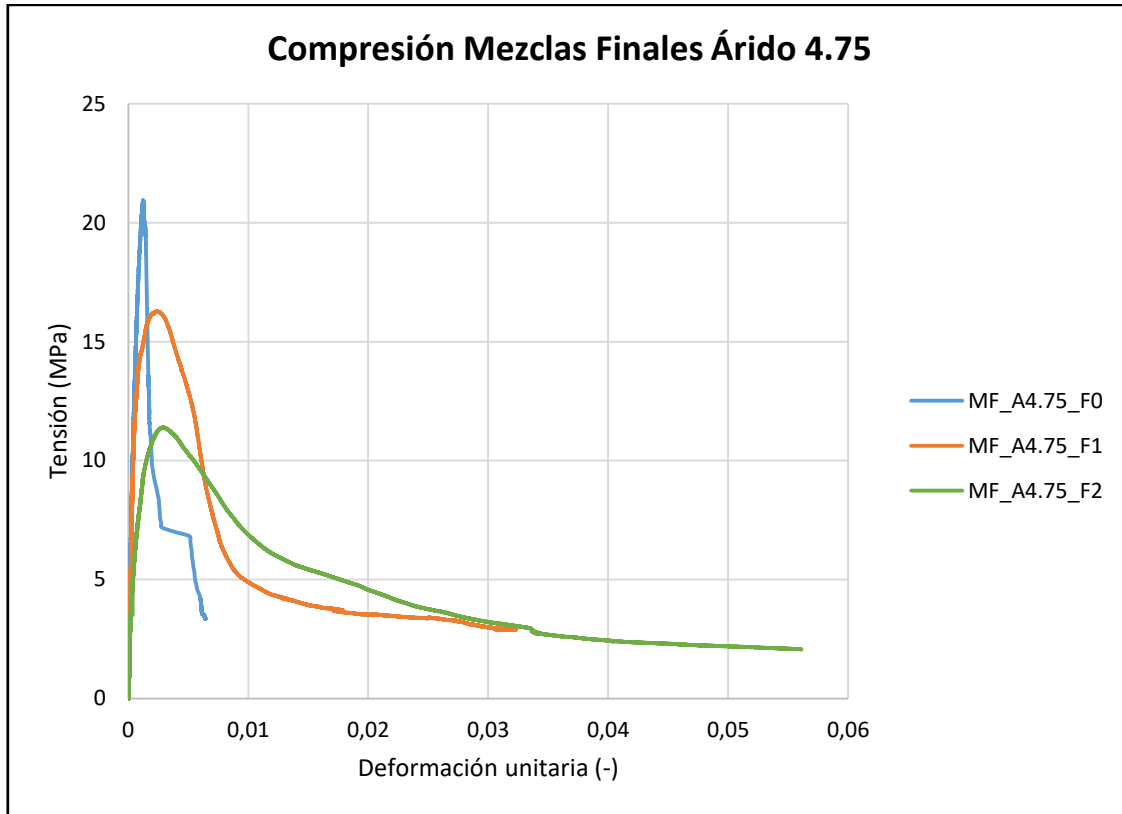


Figura 3.19 Gráficos de compresión para probetas con Dmax 4,75 mm de las mezclas finales.

Tabla 3.13 Resultados mezclas finales Dmax 4,75 mm a compresión.

<b>Mezcla</b>	<b>F'c (MPa)</b>	<b>eo</b>	<b>E (MPa)</b>
MF_A4,75_F0	20,94	0,0013	21507
MF_A4,75_F1	16,27	0,0023	18958
MF_A4,75_F2	11,39	0,003	15862

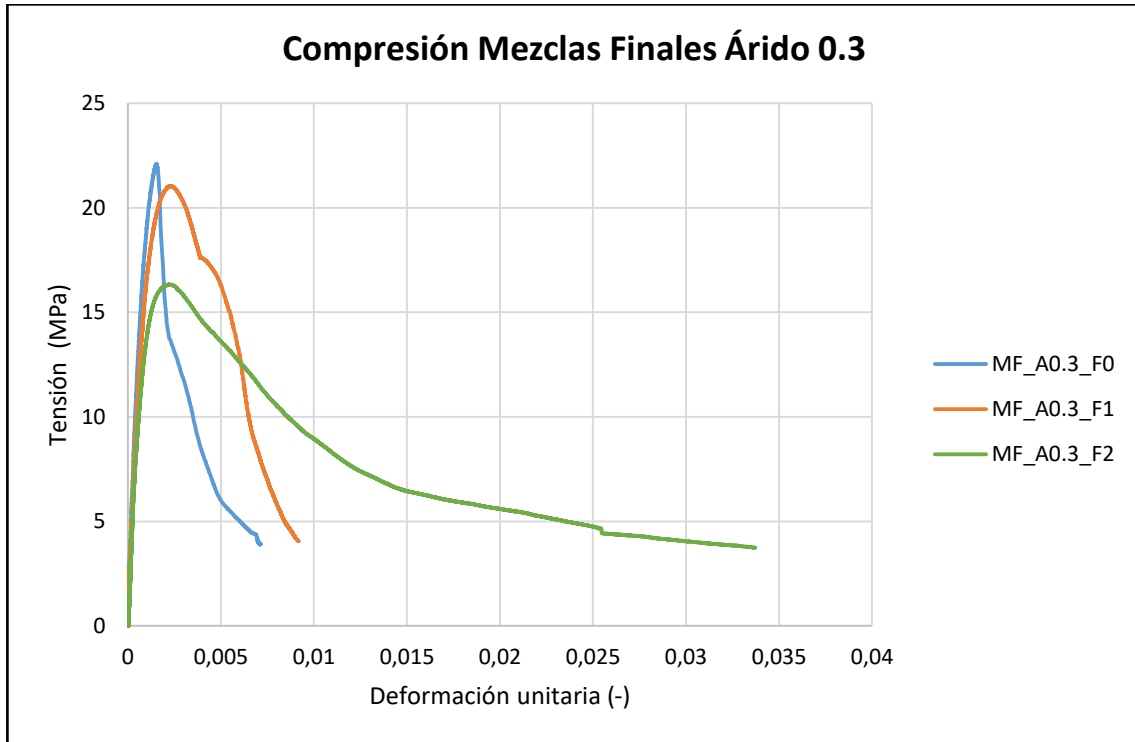


Figura 3.20 Gráficos de compresión para probetas con Dmax 0,3 mm de las mezclas finales.

Tabla 3.14 Resultados mezclas finales Dmax 0,3 mm a compresión.

<b>Mezcla</b>	<b>F<sup>'</sup>c (MPa)</b>	<b>eo</b>	<b>E (MPa)</b>
MF_A0.3_F0	22,09	0,0015	22090
MF_A0.3_F1	21,05	0,0022	21564
MF_A0.3_F2	16,33	0,0022	18993

(Los resultados de las mezclas finales a tracción se vieron alteradas al estar en malas condiciones el equipo al momento de ensayar, por lo que no se incluyen en este capítulo. Sin embargo los gráficos resultantes se encuentran disponibles en el anexo.)

Adicionalmente, en esta sección, se presentan fotos pre y post ensayo en compresión y tracción para mostrar el efecto del PVA en la fisuración de las probetas (Figuras 3.21, 3.22 y 3.24) y como las microfibras se distribuyen al interior de estas (Figura 3.23). Los ejemplos corresponden a casos con 2% de fibra para que el efecto sea más visible.

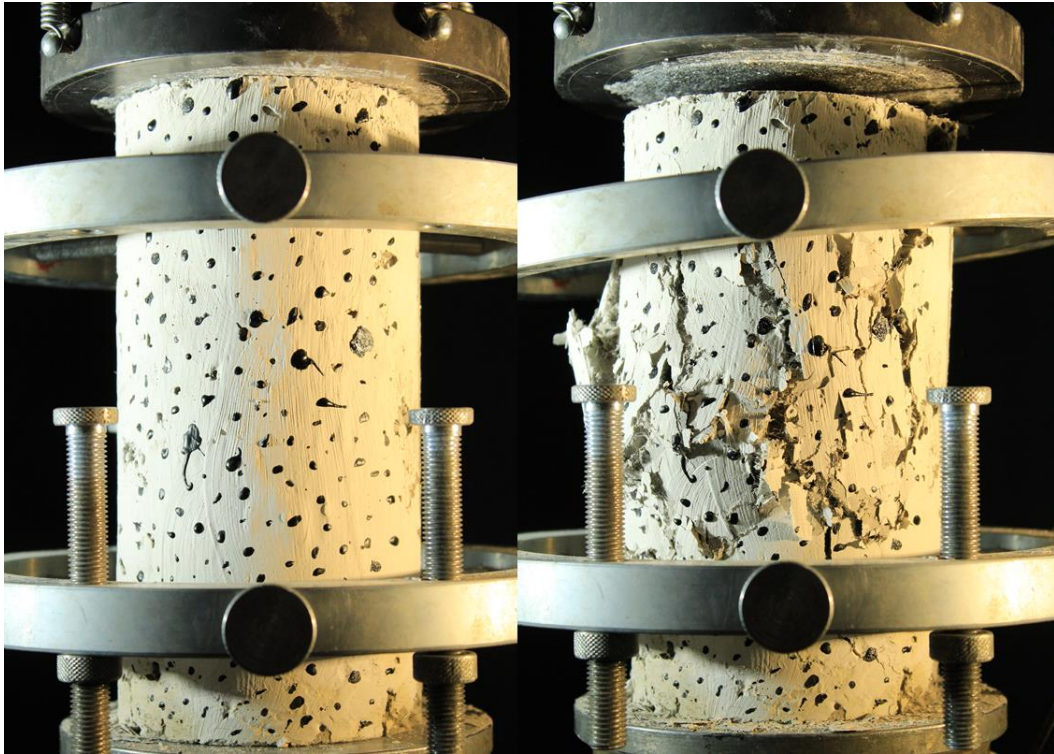


Figura 3.21 Fisuración de hormigón con microfibra de PVA, a compresión (izq.  $\epsilon = 0$ , der.  $\epsilon = 0,033$ ).

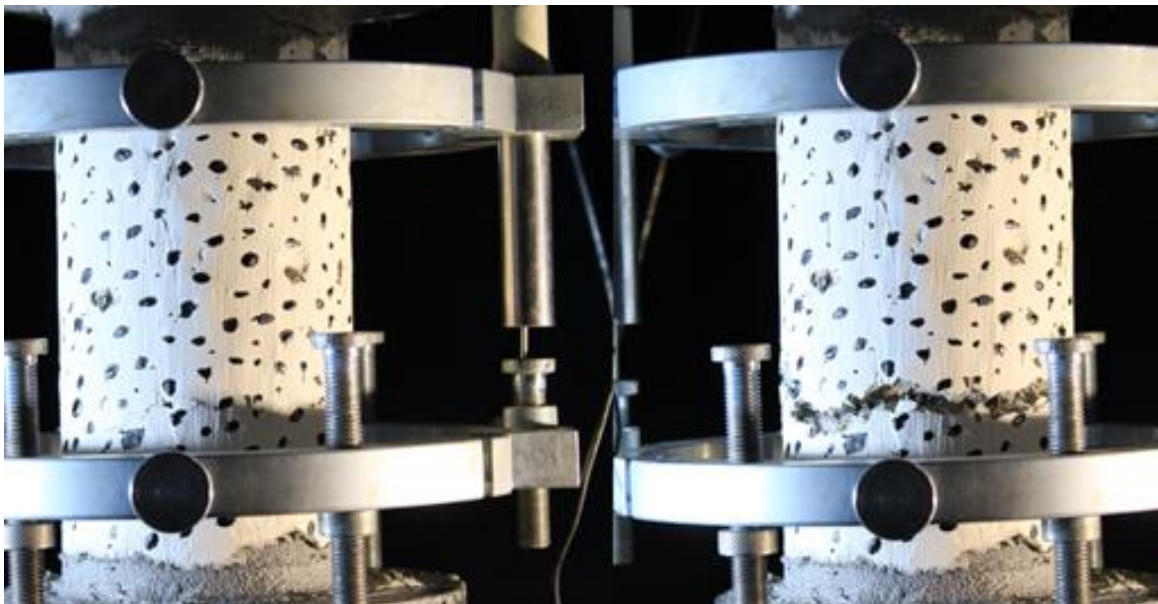


Figura 3.22 Fisuración de hormigón con microfibra de PVA, a tracción (izq.  $\epsilon = 0$ , der.  $\epsilon = 0,075$ ).



Figura 3.23 Fisura completamente abierta a tracción que presenta la distribución y orientación del PVA.

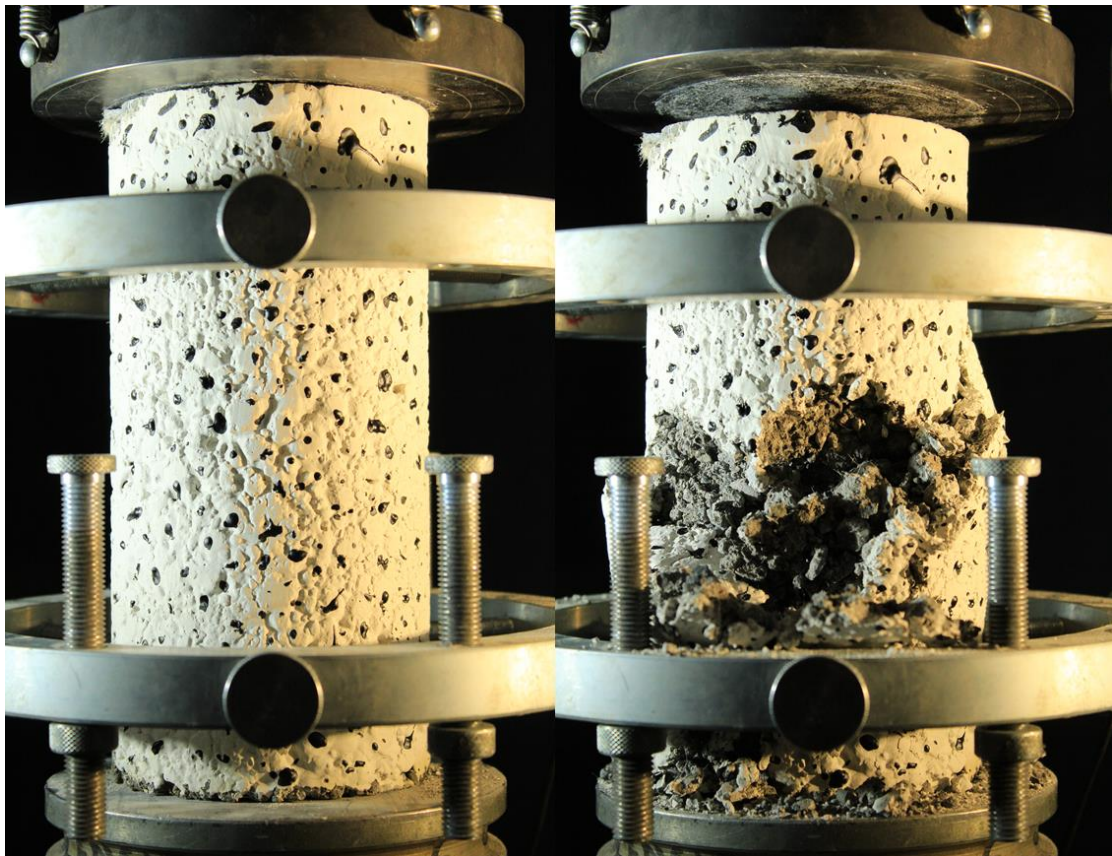


Figura 3.24 Efecto de nido generado por la falta de agua tras absorción tanto por parte de los áridos como de la fibra (izq.  $\varepsilon = 0$ , der.  $\varepsilon = 0,045$ ).

En términos generales se puede reconocer en las imágenes que con altas cantidades de microfibras la fisuración no ocurre de igual manera que como se esperaría en hormigones simples. El PVA al trabajar como puente evita el agrietamiento disminuyendo parcialmente la separación de la matriz, creando así un efecto visual de fisuración más suave.



# Capítulo 4

## Análisis

### 4.1 Parametrización y modelos

Para poder ingresar las curvas obtenidas mediante los ensayos a programas computacionales y de esta manera poder analizarlos analíticamente mediante el uso de software se debió realizar parametrizaciones. Dado que los mejores gráficos de las probetas finales fueron a compresión, fue para estos casos que se realizó parametrización, combinando fórmulas ya establecidas de la literatura con los datos experimentales adquiridos. En ciertos casos se pudo usar fórmulas conocidas directamente y en aquellos casos especiales en los que no existiese en la literatura una fórmula que aplicara de forma consistente, se desarrollaron ecuaciones mediante calibración de datos experimentales. En tracción, por otro lado, al no tener datos confiables, se tuvo que recurrir únicamente a modelos provenientes de literatura, asumiendo que estos reflejarían correctamente el comportamiento de las muestras. Adicionalmente, es importante mencionar que, debido a que el análisis posterior sería realizado para muros con confinamiento en sus bordes, se generaron también curvas de hormigón confinado a compresión tomando como base los valores de compresión no confinada.

#### 4.1.1 Compresión No Confinada

Sin importar si el hormigón poseía fibra o no, la curva ascendente para el hormigón no confinado fue definida con la siguiente fórmula de Hognestad (1951):

$$f_c = f'_c \left( 2 \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right) \quad (4-1)$$

$f_c$  : Tensión a compresión (MPa)

$f'_c$  : Tensión máxima a compresión (MPa)

$\varepsilon_c$  : Deformación unitaria a compresión

$\varepsilon_0$  : Deformación unitaria en máxima compresión (~0,002)

Además, utilizando los resultados obtenidos y mediante regresiones (empleando el coeficiente de determinación “R<sup>2</sup>” como parámetro de precisión), se realizó una fórmula para  $f'_c$  para los casos con fibra en función del volumen de fibra utilizado, el tamaño máximo de árido y el valor de  $f'_c$  para hormigón sin fibra:

$$f'_c = f'_{csf} (V_f + 1)^{-0,205} (\phi + 0,7)^{-0,135} ; \phi < 9,5 \quad (4-2)$$

$$f'_c = f'_{csf} (V_f + 1)^{-1,15} (\phi - 8,5)^\beta ; \phi \geq 9,5 * \quad (4-3)$$

\*( $\beta$  debe ser determinado con ensayos con  $\phi > 9,5$ )

$f'_{csf}$  : Tensión máxima a compresión, sin fibra (MPa)

$V_f$  : Volumen de fibra con respecto a volumen total (%)

$\phi$  : Tamaño máximo de árido en el hormigón (mm)

En cuanto a la curva descendente, esta difiere en casos con y sin fibra. Primero, para casos sin fibra, proveniente también de Hognestad (1951), esta se define de la siguiente manera:

$$f_c = f'_c \left( 1 - 0,15 \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_0}{\varepsilon_{085} - \varepsilon_0} \right) \right) \quad (4-4)$$

$\varepsilon_{085}$  : Deformación unitaria al decaer a 85% de  $f'_c$  ( $\phi \geq 9,5$ : ~0,0038 ;  $\phi < 9,5$ : ~0,0028)

Por otro lado, para modelar las curvas descendentes a compresión para hormigones no confinados con fibra, se puede utilizar el siguiente modelo de Li [5, 15] (siendo “B” un parámetro obtenido en base a los resultados a través de regresiones):

$$f_c = f'_c \left( \frac{\left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)}{B \left( \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) - 1 \right)^2 + \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)} \right) \quad (4-5)$$

$$B = \frac{0,64 - 0,036\phi}{V_f} \quad (4-6)$$

(válido hasta  $\phi = 12,5\text{mm}$ )

A partir de aquí se enseñan los gráficos con las curvas experimentales y modeladas junto a las magnitudes  $R^2$  respectivas (Figuras 4.1-9) que fueron utilizadas para verificar que las parametrizaciones fuesen adecuadas, tomándose como criterio que fueran mayores a 80%.

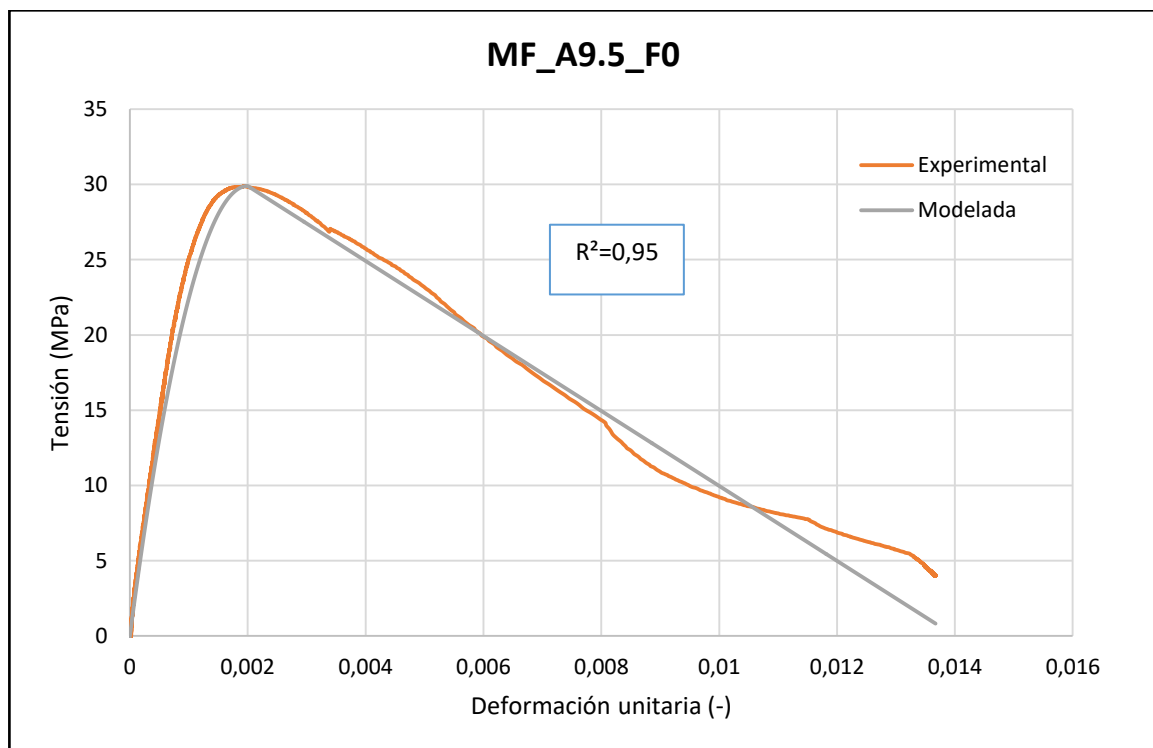


Figura 4.1 Comparación entre curva experimental y modelada para MF\_A9.5\_F0.

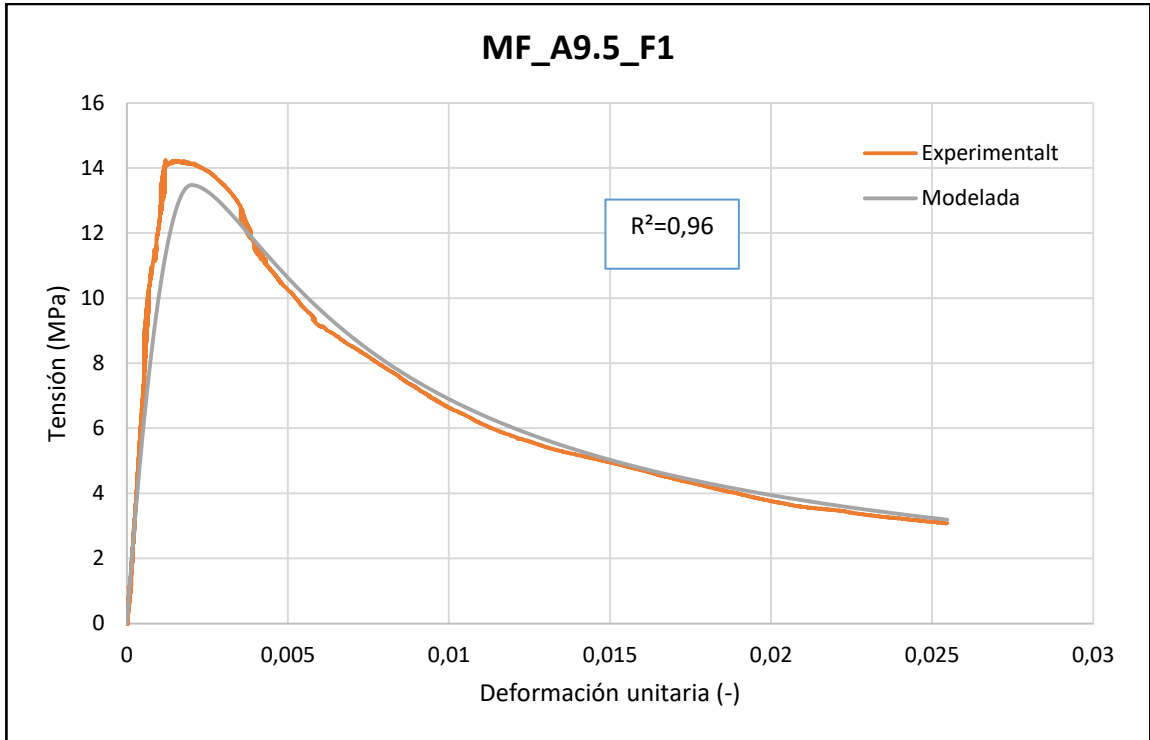


Figura 4.2 Comparación entre curva experimental y modelada para MF\_A9.5\_F1.

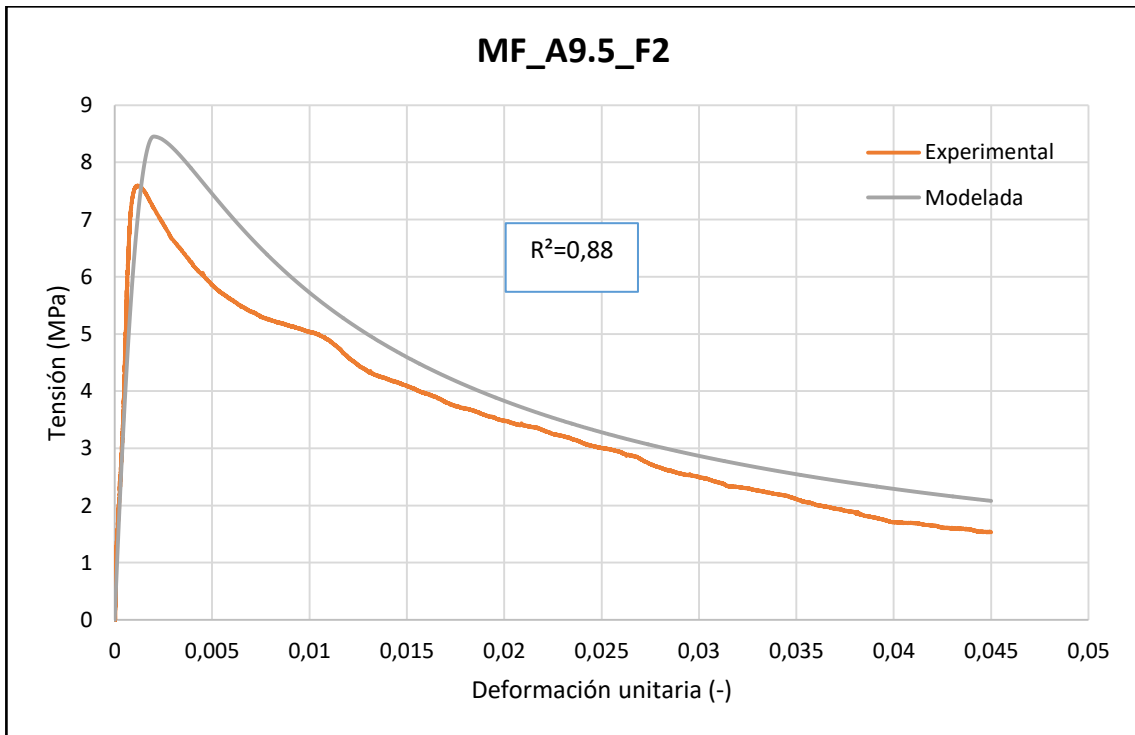


Figura 4.3 Comparación entre curva experimental y modelada para MF\_A9.5\_F2.

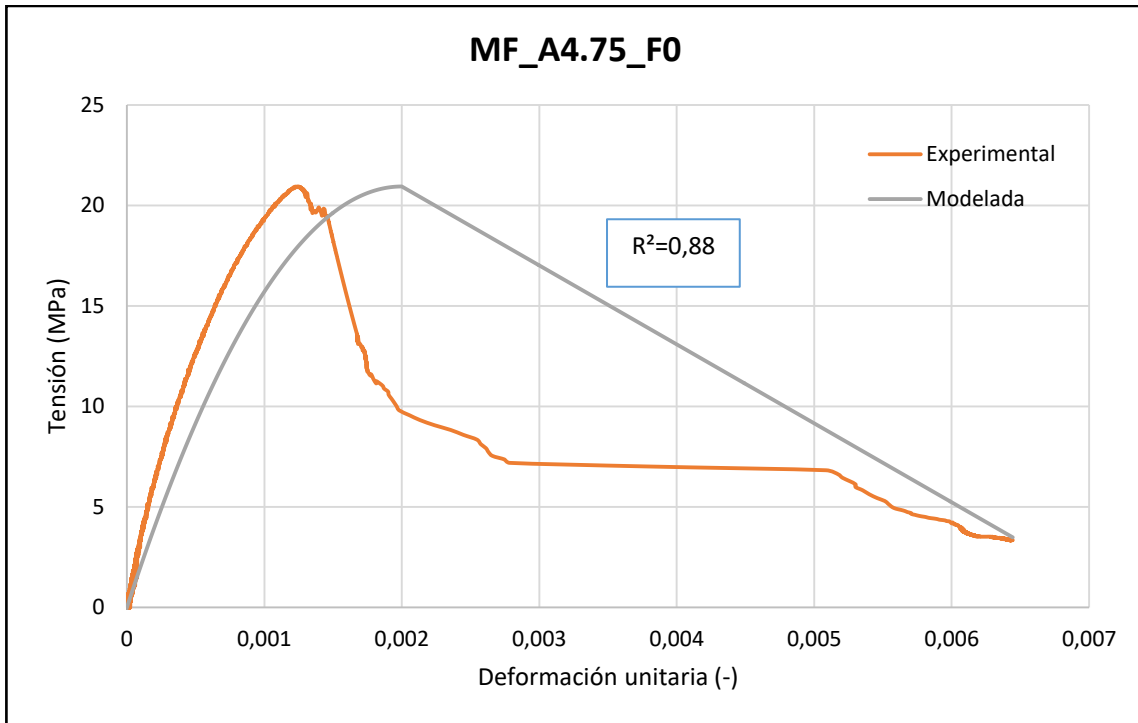


Figura 4.4 Comparación entre curva experimental y modelada para MF\_A4.75\_F0.

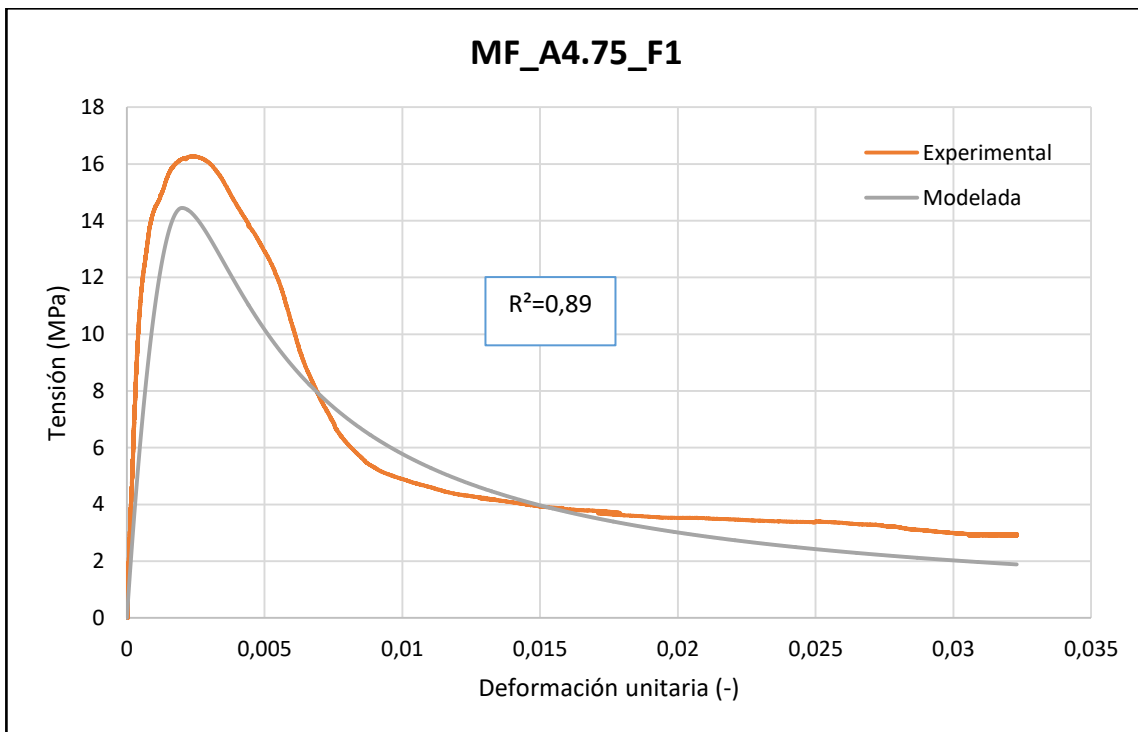


Figura 4.5 Comparación entre curva experimental y modelada para MF\_A4.75\_F1.

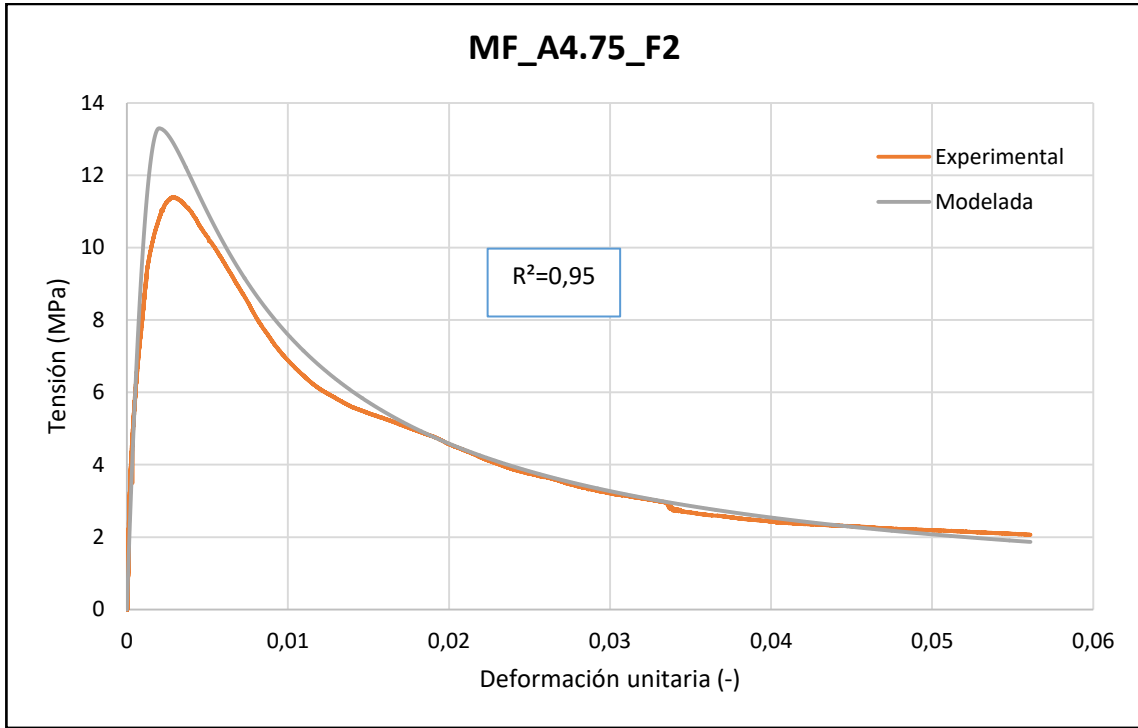


Figura 4.6 Comparación entre curva experimental y modelada para MF\_A4.75\_F2.

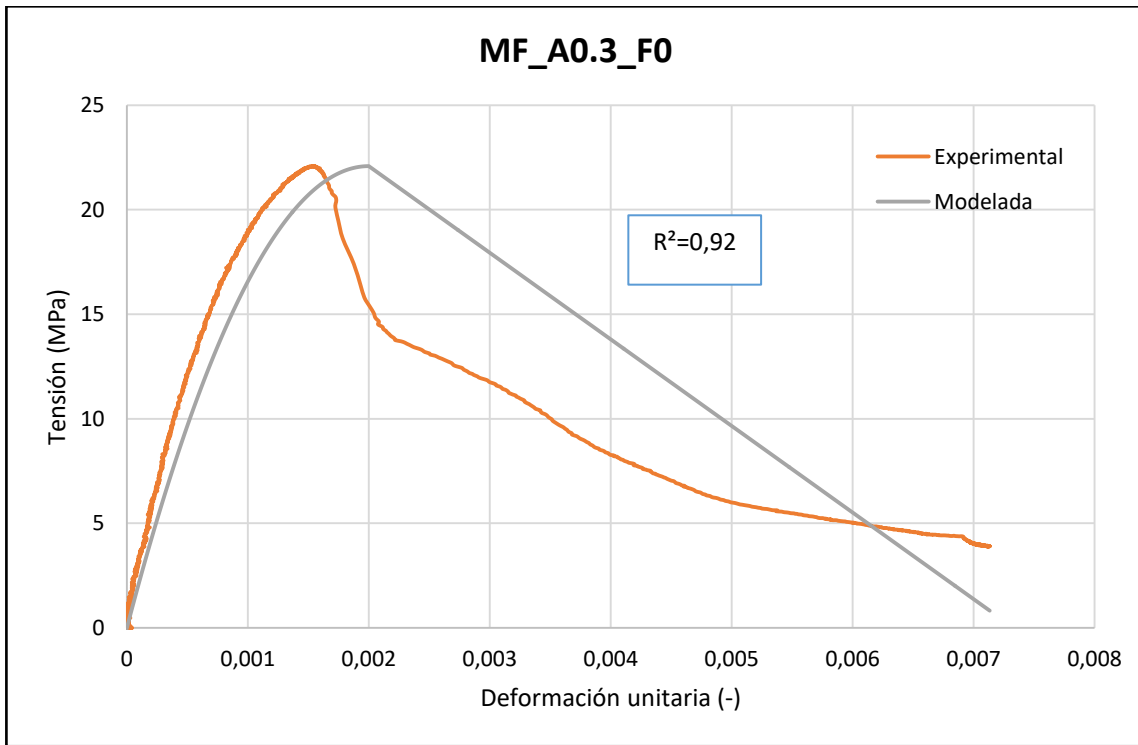


Figura 4.7 Comparación entre curva experimental y modelada para MF\_A0.3\_F0.

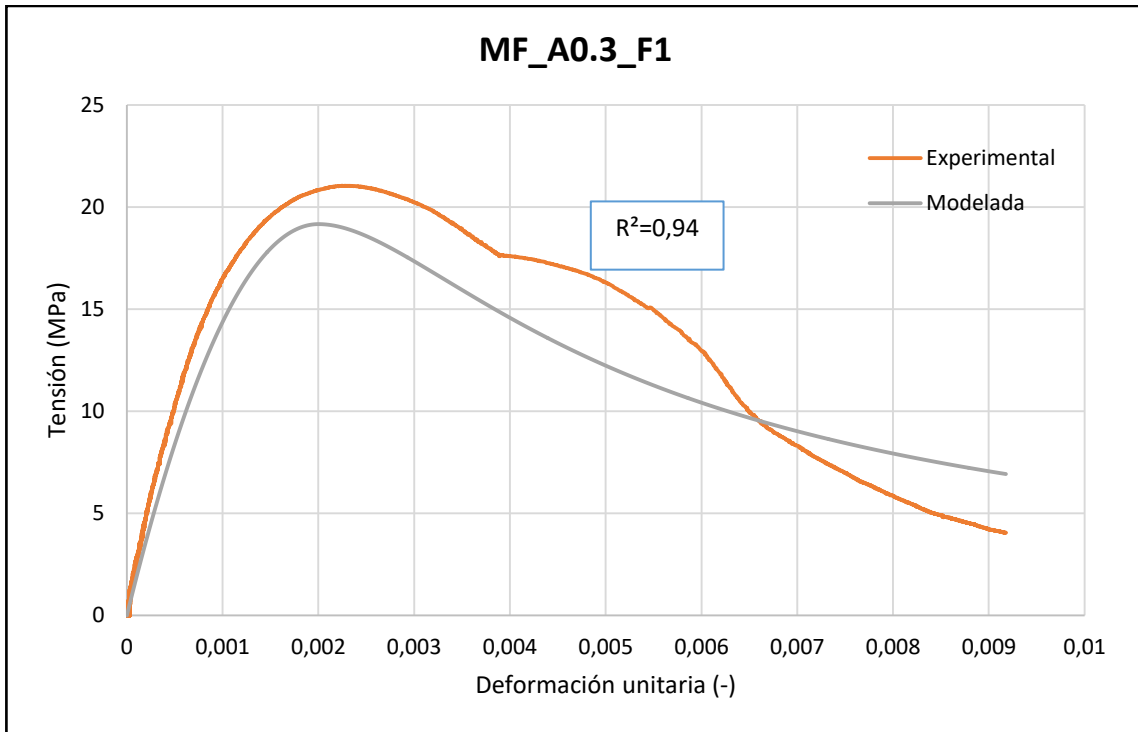


Figura 4.8 Comparación entre curva experimental y modelada para MF\_A0.3\_F1.

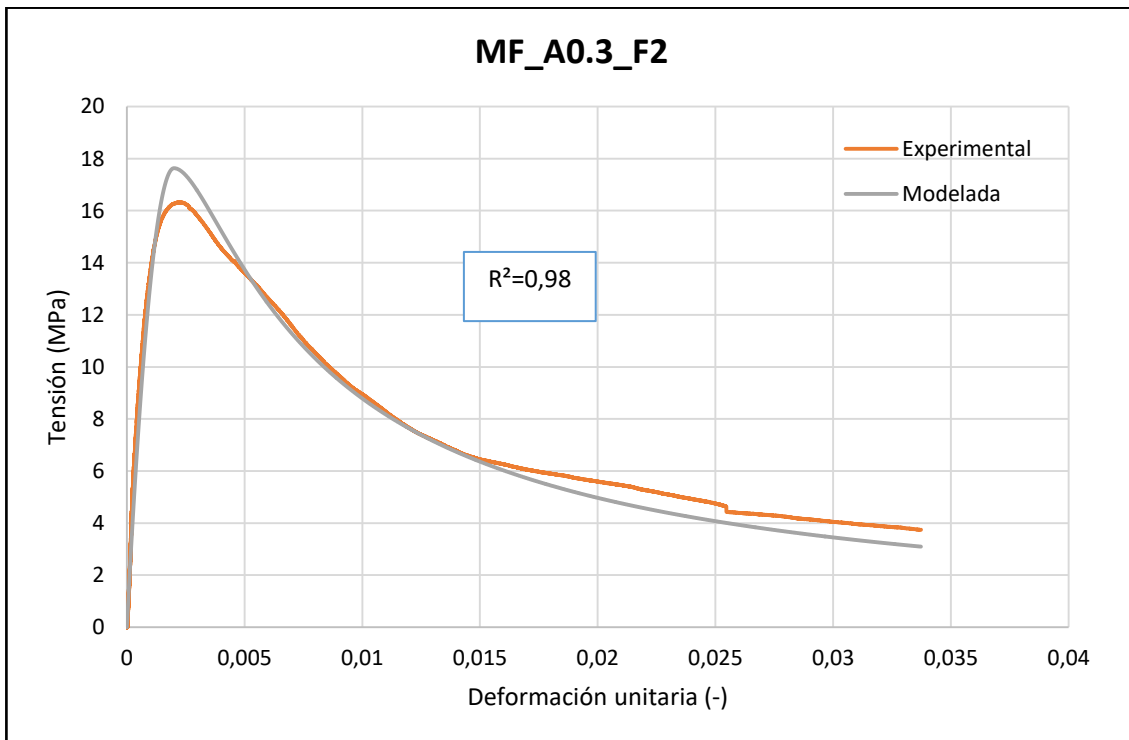


Figura 4.9 Comparación entre curva experimental y modelada para MF\_A0.3\_F2.

## 4.1.2 Compresión Confinada

Para la sección confinada se consideró igual modelamiento en casos con y sin fibra. Aquí la función usada fue la de Saatcioglu & Razvi (1992). Dada la cantidad de sub fórmulas que incluye este modelamiento, se presentarán solo aquellas que definen directamente la curva. Sin embargo, es importante informar al lector que estas se obtuvieron de considerar una zona confinada de 250x250 mm<sup>2</sup> con estribos de 10 mm de diámetro, de un acero con límite de fluencia igual a 420 MPa y con espaciamiento vertical de 75 mm (cumpliéndose con normativas de espaciamiento y cuantía según ACI 318). Se debe entender, además, que los modelamientos confinados corresponden a modelamientos no confinados con pequeñas variaciones en base a las propiedades del hormigón. Dicho de otra manera, las fórmulas empleadas son bastante similares a las presentadas anteriormente para ascenso y descenso sin fibra, pero con una nueva tensión máxima y una nueva deformación unitaria para la tensión máxima.

Nueva tensión máxima:

$$f'_{cc} = f'_c + 6,42 \quad (4-7)$$

Nueva deformación unitaria asociada a la tensión máxima:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 \left( 1 + \frac{32,1}{f'_c} \right) \quad (4-8)$$

Nueva deformación unitaria asociada al 85% de la tensión máxima:

$$\varepsilon_{85} = 1,09\varepsilon_1 + \varepsilon_{085} \quad (4-9)$$

Con estos nuevos términos, las fórmulas de los gráficos para casos confinados quedan de la siguiente manera:

Curva ascendente:

$$f_c = f'_{cc} \left( 2 \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right)^{\frac{1}{1 + \frac{12,84}{f'_c}}} \quad (4-10)$$

Curva descendente:

$$f_c = f'_{cc} \left( 1 - 0,15 \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_1}{\varepsilon_{85} - \varepsilon_1} \right) \right) \quad (4-11)$$



A modo de ejemplo, se presentan dos casos: uno con fibra y uno sin fibra, en donde se contrastan las curvas no confinadas con sus respectivas curvas confinadas obtenidas mediante las ecuaciones anteriores (Figuras 4.10 y 4.11).

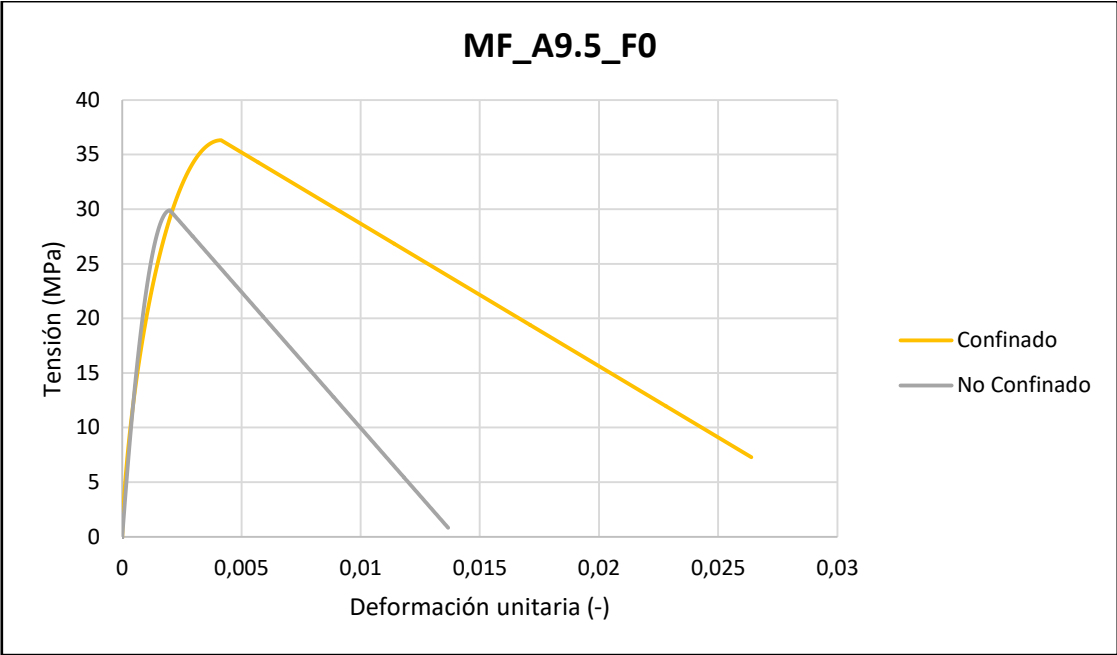


Figura 4.10 Ejemplo curva de hormigón confinado sin fibra.

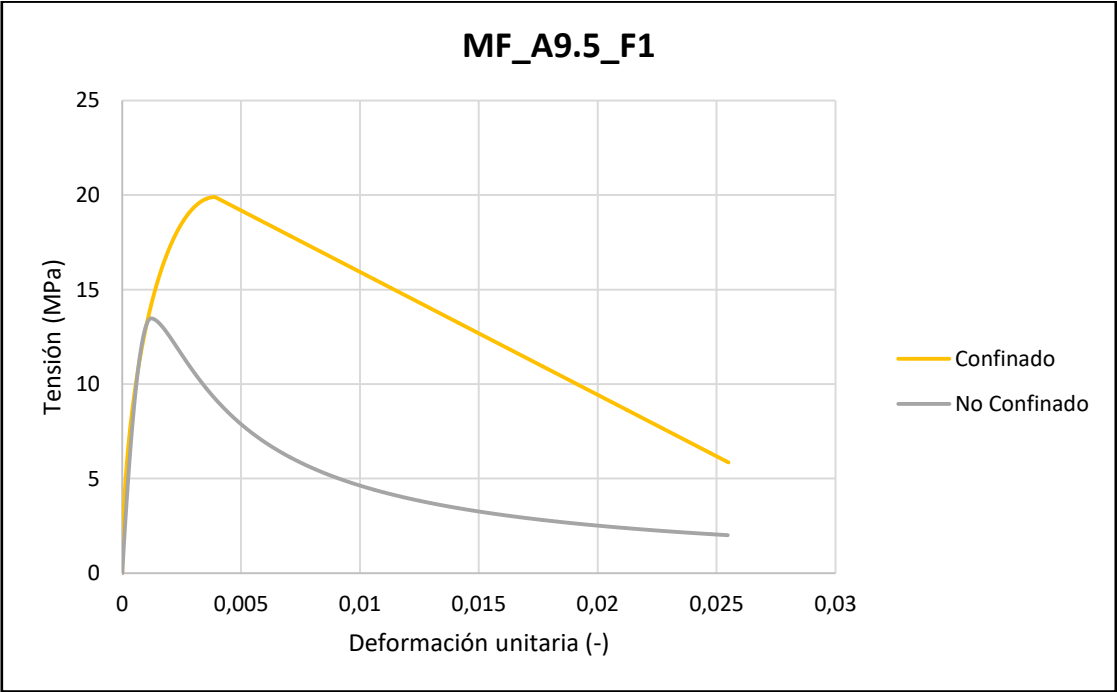


Figura 4.11 Ejemplo curva de hormigón confinado con fibra.

### 4.1.3 Tracción

En lo que respecta a tracción, al momento de generar las curvas, no se distinguió entre confinado y no confinado, el único tipo de clasificación que se consideró fue si era una mezcla con fibra o sin fibra. En casos sin fibra, como es sabido, el hormigón no es capaz de soportar mucha carga a tracción y su comportamiento corresponde a una recta que llega hasta el siguiente valor:

$$f'_t = 0,4\sqrt{f'_c} \quad (4-12)$$

Para lo cual, si se considera un módulo de elasticidad igual a:

$$E = 4700\sqrt{f'_c} \quad (4-13)$$

La deformación unitaria última a la que llega el hormigón a tracción es  $\varepsilon_{tu} = 8,5 \times 10^{-5}$ . Y con esto se obtiene una recta como lo que se observa abajo en el gráfico de la Figura 4.12.

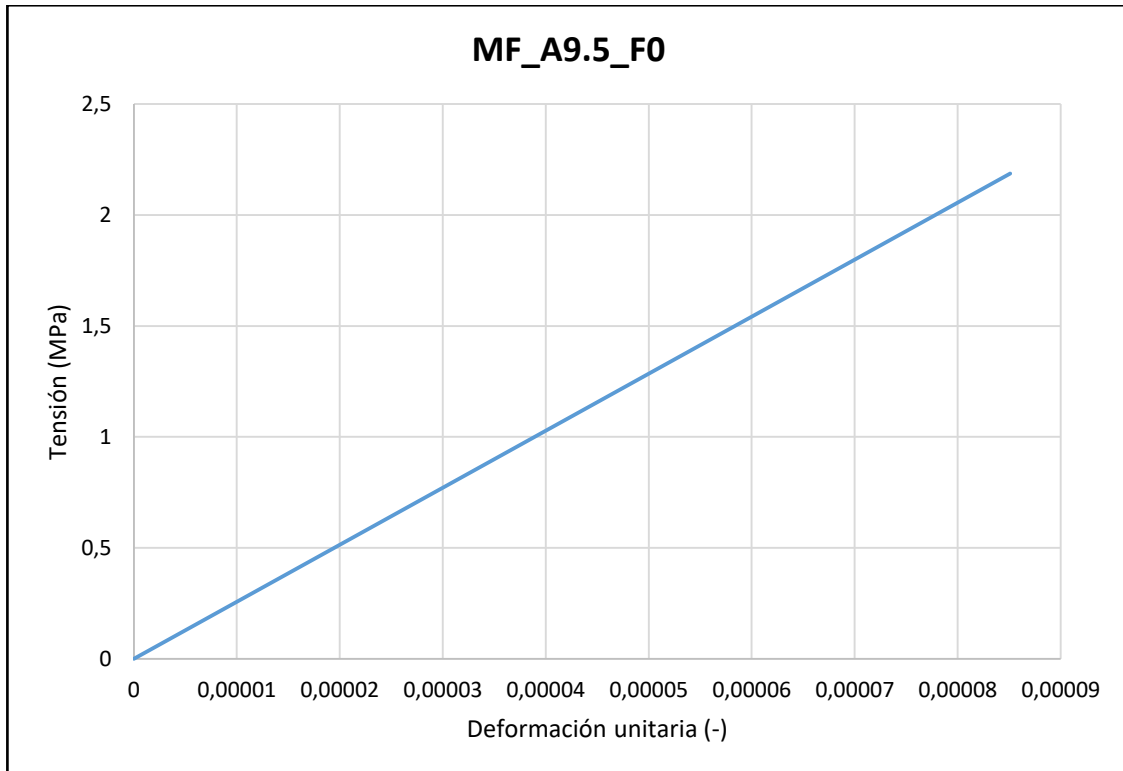


Figura 4.12 Ejemplo tracción sin fibra.

Por otro lado, para hormigones con fibras, el mismo peak presentado anteriormente es alcanzado cuando los porcentajes de fibra de PVA son menores al 10%. No obstante, tras llegar a la tracción máxima, en vez de dejar de soportar carga, esta decae hasta una cierta coordenada  $(\varepsilon_{i0}, f_{i0})$  y se mantiene en  $f_{i0}$  hasta una deformación unitaria de aproximadamente 0,001 (según literatura, aproximadamente 10 veces la deformación máxima a tracción sin fibra). La fórmula para obtener las coordenadas de ese punto se obtienen gracias al modelamiento de Kullaa [12] (modelo presentado en Figura 4.13 y ejemplo del modelo aplicado en Figura 4.14) y poseen la siguiente forma:

$$f_{i0} = \frac{f'_t}{4,6V_f} \quad (4-14)$$

$$\varepsilon_{i0} = \varepsilon_{tu} (0,02V_f + 1) \quad (4-15)$$

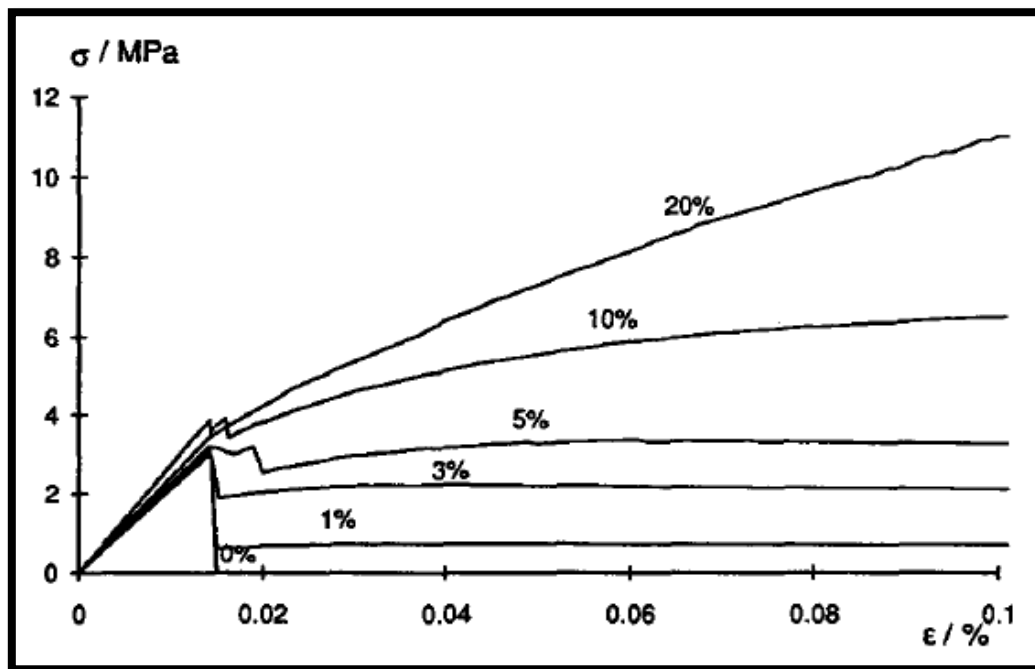


Figura 4.13 Efecto de la fibra en la curva tensión-deformación según Kullaa. [12]

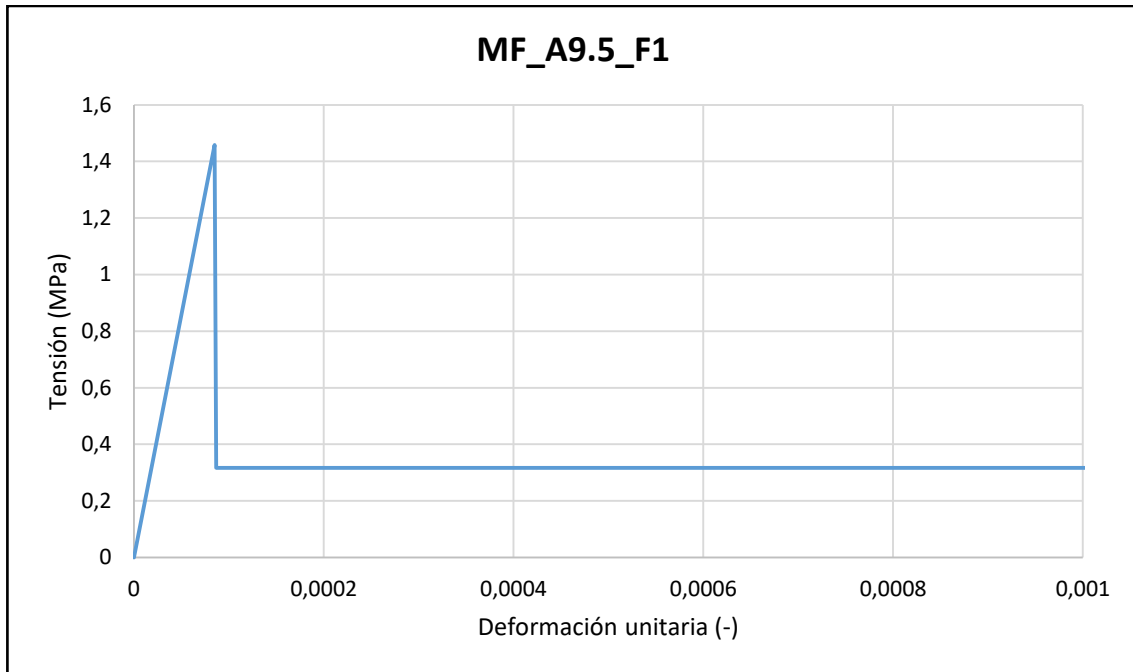


Figura 4.14 Ejemplo tracción con fibra.

## 4.2 Análisis Pushover

De manera de obtener resultados comparables, en una estructura convencional como lo son muros de hormigón armado, utilizando toda la caracterización que se le ha dado al FRC mediante ensayos, parametrización y modelos, se realizó un análisis de Pushover utilizando el software SAP2000. Este análisis consistió en cargar axialmente, en su punto más alto con una carga de 4500 kN, una torre compuesta por 10 muros de 2,5 metros de altura cada uno y lateralmente, en el punto más alto, establecer una carga P que fuese aumentando gradualmente. Dichos muros poseían una sección transversal de 5 metros de largo y 0,3 metros de ancho, definiéndose la zona de borde como los últimos 0,3 metros de cada extremo, siendo la zona confinada un cuadrado de 250x250 mm<sup>2</sup> (Figura 4.15). En los bordes se determinó que habría una cuantía de aproximadamente 0,027 (con cuatro barras longitudinales de 28 mm) y la cuantía de repartición sería de 0,0026 (con treinta barras longitudinales de 12 mm). El modelo establecido para esto se presenta en la Figura 4.16 y muestra las discretizaciones vertical (los 10 pisos ya mencionados), horizontal (3 secciones, 2 de borde y una central), las alturas y las cargas aplicadas. Las curvas utilizadas para compresión no confinada, confinada y tracción son las modeladas y presentadas en las secciones 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3 respectivamente. Para mayor simplicidad, los apoyos se modelaron como apoyos simples definiéndose el análisis dentro del programa como un análisis plano, dando libertad de desplazamiento únicamente a X e Y.

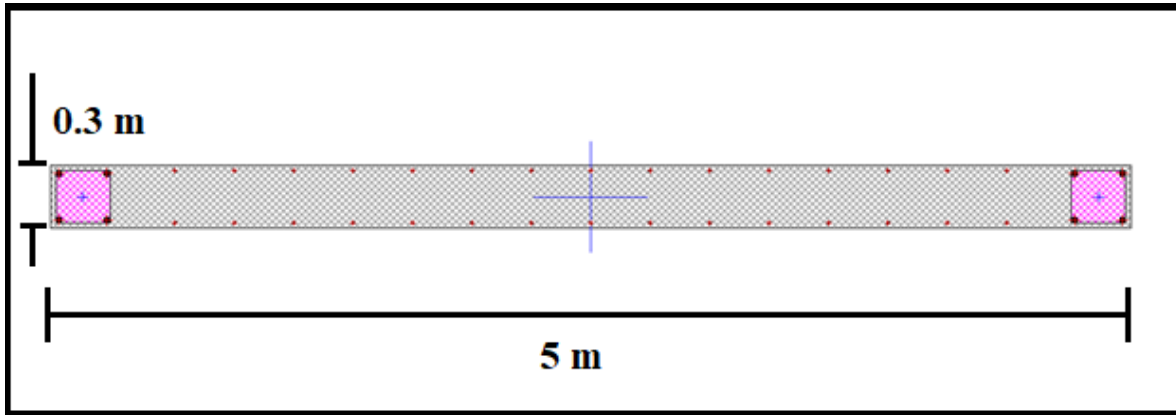


Figura 4.15 Sección de muro y disposición de armadura empleados en el análisis.

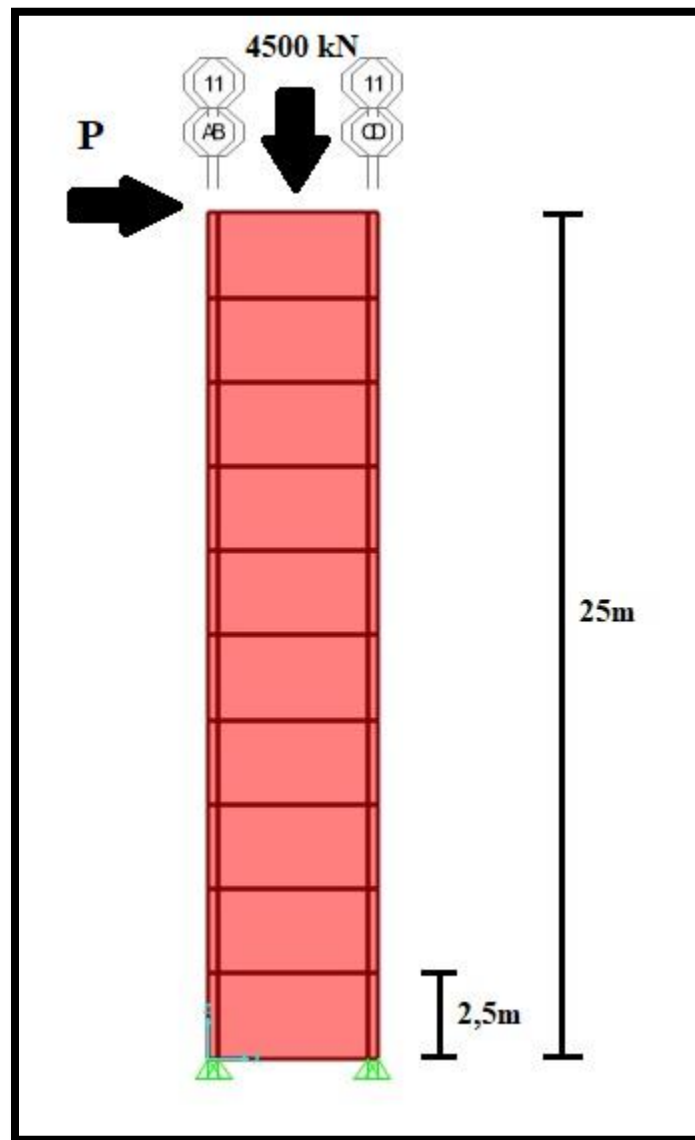


Figura 4.16 Discretización, altura del muro analizado y cargas aplicadas.

Los resultados obtenidos tras procesar el modelo con el análisis Pushover para cada combinación de tamaño máximo de árido y volumen de fibra son presentados a continuación en gráficos de carga versus desplazamiento (Figuras 4.17-19), en donde el desplazamiento corresponde a aquel en el punto más alto, donde se aplica la carga P.

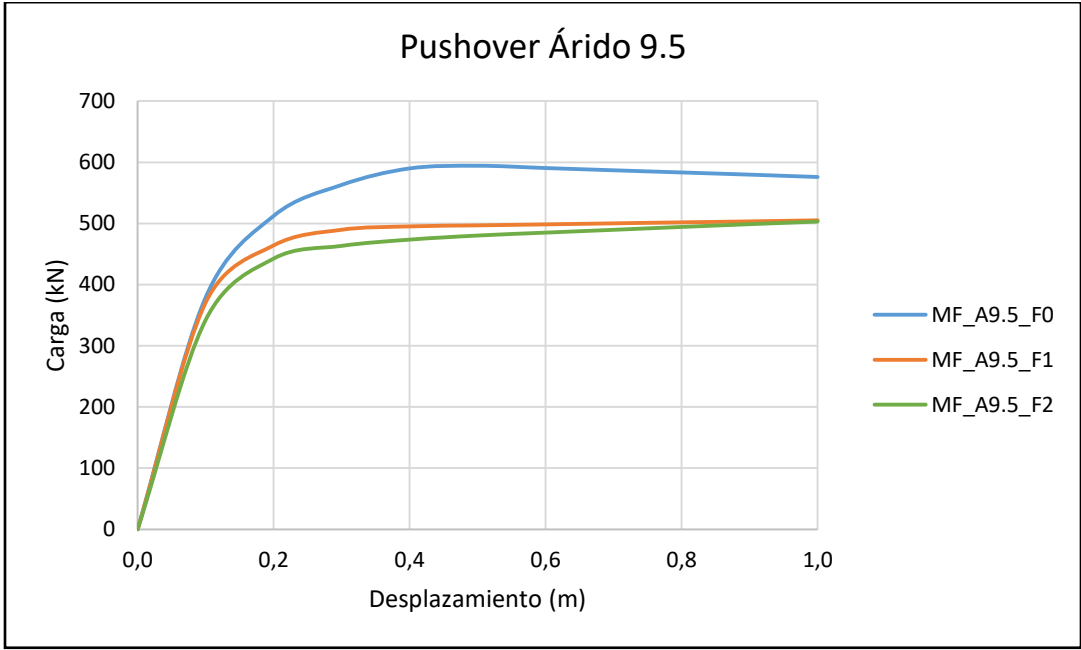


Figura 4.17 Análisis Pushover para hormigones con Dmax 9,5 mm.

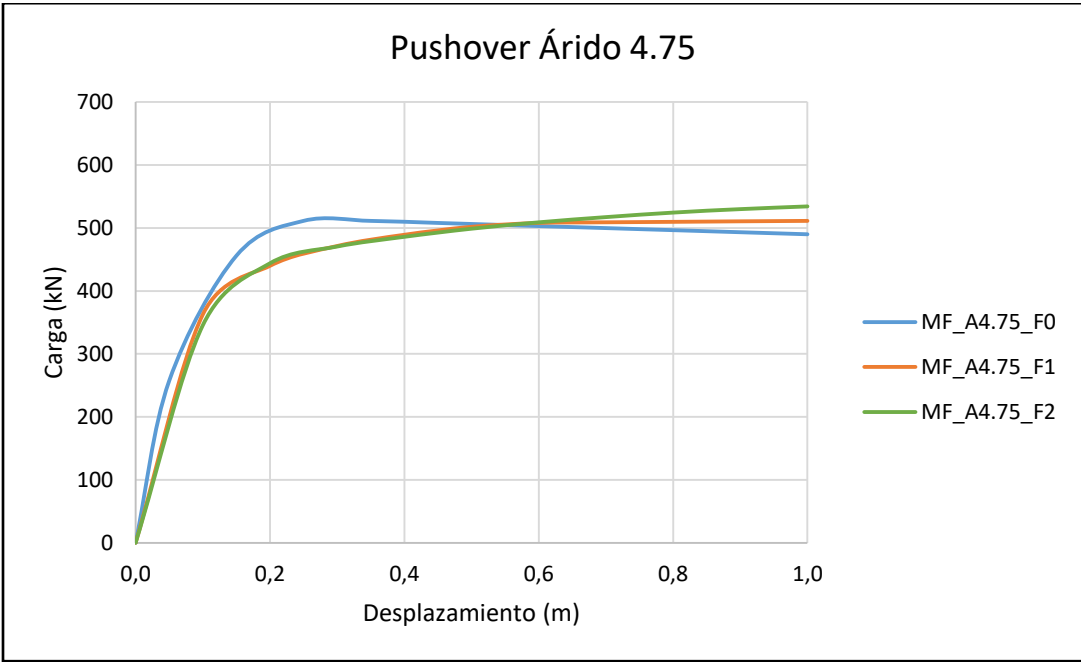


Figura 4.18 Análisis Pushover para hormigones con Dmax 4,75 mm.

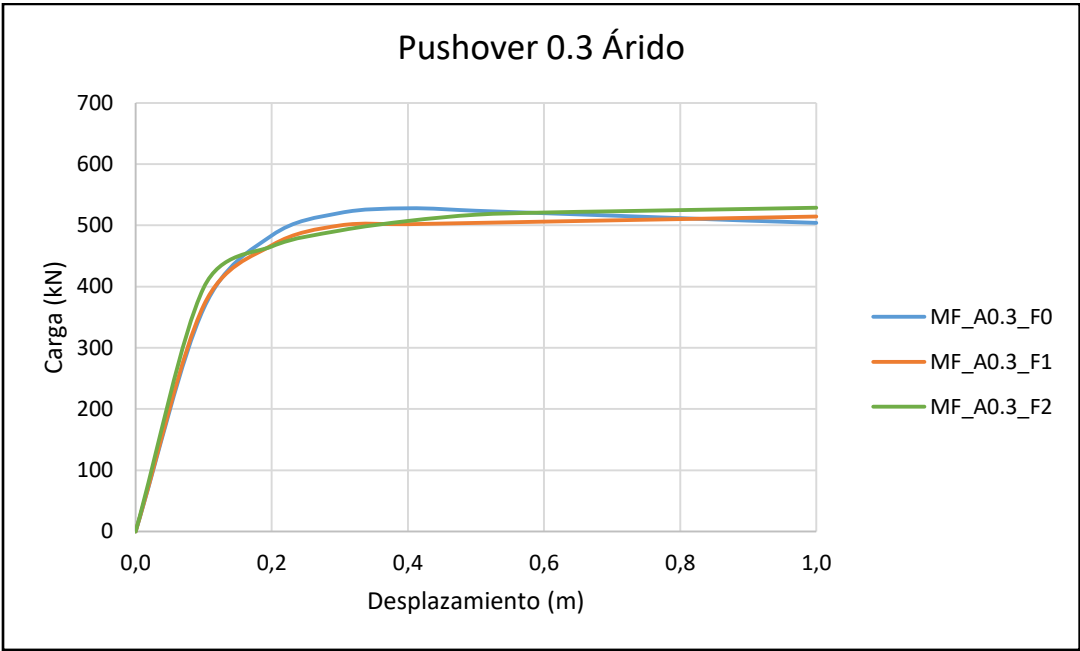


Figura 4.19 Análisis Pushover para hormigones con D<sub>max</sub> 0,3 mm.

# Capítulo 5

## Conclusiones

Para comenzar, tal como lo menciona la literatura, el comportamiento en la región elástica de hormigones tanto con fibra como sin fibra, independientemente de si es a compresión o a tracción, es similar. Tras alcanzarse una resistencia máxima, el decaimiento de la curva tensión versus deformación unitaria demuestra la diferencia entre que la mezcla posea fibra o no. Esto se debe a que es en este momento, cuando empieza a haber fisuración en el elemento, que la fibra comienza a trabajar como puentes disipando energía.

Ahora bien, como fue presentado en la revisión bibliográfica, lo esperado correspondía a que en el caso de probetas ensayadas a compresión la resistencia máxima fuese un tanto menor en los casos con fibra que en aquellos casos sin. La Figura 2.5 explica este fenómeno con un efecto que produce la adición de fibra en el hormigón, el aumento de vacíos en la matriz. Los ensayos preliminares y finales demuestran que esto es precisamente lo que ocurre. Sin embargo, el ejemplo bibliográfico que se presentó solo alude a un tamaño máximo de árido por lo que no es sino hasta que se obtuvieron los resultados que se pudo comprobar que esto ocurre en compresión para todo tamaño de árido. Con respecto al descenso de la curva post-peak, en los resultados se observa que, a diferencia de lo descrito en los documentos que se usaron como referencia para la compresión, la caída es más abrupta en hormigones sin fibra. Se puede inferir que esto ocurre debido a que, aunque las fibras no actúen directa y uniaxialmente como puentes como lo sería en tracción, estas si permiten a la probeta deformarse un poco más al resistir sin cortarse, en otras direcciones, obteniéndose una degradación de la tensión mucho más lenta y deformaciones unitarias últimas un poco mayores.

En lo que a tracción concierne, dado que la máquina universal no funcionó correctamente en los ensayos finales, el único punto comparativo que se tiene para comparar entre literatura y resultados son las curvas obtenidas en los ensayos preliminares. No obstante, a grandes rasgos, se observa que en términos generales se cumple la hipótesis que entrega las Figuras 2.4 (a) y (b). Es decir, para hormigón a tracción reforzado con fibra de PVA, la resistencia máxima alcanzada puede llegar a ser mayor, igual o inferior al caso base sin fibra (esto dependiendo del volumen y dimensiones de la fibra) pero sin variar considerablemente. Hay que tomar en cuenta que el ejemplo corresponde a ECC, por lo que las capacidades a tracción ya son mayores de lo usual y cualquier mejora en las propiedades mecánicas esta amplificada con relación a un hormigón tradicional. También se aprecia que, al igual que en compresión, la deformación última aumenta y en vez de reducirse bruscamente, la tensión, existe un residual.



En esta tesis, un factor que se buscaba investigar, era la relación entre el tamaño máximo de árido y la eficiencia de la fibra en las propiedades mecánicas del hormigón. Por esto mismo en cada etapa se trabajó con diferentes tamaños de árido. El problema, en lo que a compresión respecta, es que existen contradicciones en los resultados entre las mezclas preliminares y las finales, pero debido a que estas últimas se realizaron con mayor cantidad de muestras y mayor precaución (tomando lo aprendido de la experiencia preliminar) se utilizarán estas como referencia. Partiendo por el caso de las mezclas con tamaño máximo de árido igual a 9,5 milímetros, se puede apreciar gracias a la Figura 3.18 y la Tabla 3.12 que la variación en resistencia entre los casos con y sin fibra es de gran magnitud. Siendo aún más específicos, cuando se tiene un 1% de volumen de fibra con respecto al volumen total de la probeta, el valor de  $f_c$  se reduce aproximadamente a la mitad (reducción de 50%) de lo que es en el caso sin fibra. Lo que es más, cuando el volumen de fibra llega al 2% la tensión máxima es solo un cuarto (reducción de 75%) del  $f_c$  del caso base. Esto entrega una primera conclusión que confirma lo mencionado anteriormente con respecto a la compresión: mayor cantidad de fibra, mayor cantidad de vacíos, menor resistencia a compresión. Continuando con las mezclas de árido igual a 4,75 milímetros, la Figura 3.19 y la Tabla 3.13 presentan que en el caso de 1% la reducción es de 22% y para el 2% de fibra, esta es de 46%. Con esta nueva información se comienza a apreciar lo siguiente: a menor tamaño máximo de árido, menor será la reducción porcentual de resistencia con respecto al hormigón sin fibra, para un mismo porcentaje de volumen de fibra. Observando las últimas mezclas, con árido de 0,3 milímetros se confirma lo anterior, con 1% de fibra la reducción es de tan solo un 5% y con 2% de fibra es de un 26%. No obstante, es importante no dejar de lado el hecho de que, las mezclas que solo poseen arena ya de por sí poseen un  $f_c$  base menor que aquellas mezclas con gravilla, por lo que, si bien, desde un punto de vista de reducción porcentual de pérdida es mejor usar áridos más pequeños, desde el aspecto de la resistencia absoluta puede no serlo (por ejemplo: la mezcla MF\_A9.5\_F0 posee un  $f_c$  de casi 30 MPa mientras que la mezcla MF\_A0.3\_F1 posee un  $f_c$  de 21 MPa). Una posible explicación para todo esto, es el hecho de que al tratarse de microfibras, esta por su tamaño se incorpora de mejor manera en mezclas con áridos más pequeños encajando con ellos, mientras que en mezclas con áridos más grandes solo se producen más huecos. Adicionalmente, se puede apreciar que entre mayor es la resistencia de la mezcla con fibra (o menor la reducción con respecto al caso base) menos se extiende la tensión residual, es decir, se alcanzan deformaciones últimas menores.

De los resultados obtenidos a compresión en la etapa final se pudo, mediante regresión, ajustar modelos ya existentes para conseguir parametrizaciones adecuadas que describieran el comportamiento de las curvas de cada mezcla. En particular, estas regresiones fueron necesarias para obtener una fórmula que representara la reducción de la resistencia a compresión con la adición de fibra y una fórmula para el coeficiente que describía la degradación de las curvas con fibra post-peak, "B". Para la primera fórmula, se obtuvo algo que confirma la conclusión a la que se llegó previamente, es decir, que tanto un aumento en la cantidad de fibra como en el tamaño del árido afectan negativamente en la tensión máxima que se obtendrá con respecto a un caso análogo sin fibra. Por otro lado, de la fórmula de B, se confirma que un aumento en la fibra produce que la curva tensión versus deformación degrade menos en su descenso, lo cual se puede intuir lógicamente.

Con la similitud que hay entre las parametrizaciones y las curvas reales, se puede decir que estas fórmulas son buenas aproximaciones, aún más considerando que el valor más bajo para el factor  $R^2$  fue 0,88 (una cantidad bastante razonable). A su vez, de los gráficos de la Figura 4.10 y 4.11, se puede constatar que el modelo de Saatcioglu & Razvi para compresión confinada aplica correctamente tanto para casos con cómo sin fibra. Dado que los resultados a tracción de las mezclas finales no son fiables y los de la etapa preliminar son muy pocos, para este tipo de esfuerzo se recurrió a modelos preestablecidos. Sobre esto, se pueden realizar comparaciones entre lo obtenido y el modelo de Kulla. Lo primero, si se observan bien las Figuras 2.4 y 4.14 se puede notar que existe una cierta similitud. En términos generales revisando los dos tipos de gráficos, a tracción con fibra, el hormigón alcanza un máximo cercano a aquel que logra obtener sin fibra, pero la diferencia recae en que cuando se tiene fibra, la curva disminuye hasta un cierto valor y luego sigue con una tensión residual. Esto confirma lo que se describía en un principio para la tracción. Se ve tanto en los gráficos de otros estudios, como en el modelo de Kulla, como en los resultados de las mezclas preliminares. Por lo tanto, se puede decir que este es un modelo aceptable y útil. Dado que se quiso simplificar dicha parte de las parametrizaciones, no se presentó la verdadera fórmula ascendente de Kulla, sin embargo, es importante mencionar que esta fórmula también confirma algo propuesto en el capítulo de revisión bibliográfica. Dentro de la fórmula se aplican dos factores que dependen de si las fibras están con un mismo ángulo o no (o en otras palabras, si es que están alineadas). La fórmula corrobora lo que se ve en la literatura y que uno podría imaginarse con respecto a la orientación de la fibra. Si todas se encuentran en la misma dirección, trabajarán en conjunto para evitar lo más posible que el hormigón se separe en donde se produzcan fisuras. Efectivamente este modelo que proviene de refinar modelos anteriores de tracción en FRC es de gran utilidad y ratifica lo que se ha podido observar en investigaciones anteriores de este tipo de material compuesto.

En cuanto al análisis Pushover realizado en el capítulo 4, es apreciable en la Figura 4.17 que una torre con hormigón de árido de tamaño máximo igual a 9,5 milímetros, modelado sin microfibras de PVA, es igual o superior en todo momento a sus equivalentes con 1% y 2% de PVA. En otras palabras, sin importar el desplazamiento de techo, la carga horizontal requerida para llegar a esa magnitud siempre es igual o superior en casos sin PVA. Esto se suma a las conclusiones obtenidas previamente respecto a hormigones con áridos de mayor tamaño, confirmando así que la fibra de PVA de pequeño tamaño no posee buena compatibilidad con áridos grandes por la manera en que interactúan estos dos componentes al interior de la mezcla. Luego, en la Figura 4.18 se observa que existe un punto (aproximadamente a los 0,55 metros de desplazamiento de techo) en el que las curvas que representan los modelos con PVA logran sobrepasar la curva del modelo sin PVA, encontrándose también a partir de este momento el 2% de fibra por sobre el 1% como sería de esperarse. Nuevamente se confirma lo obtenido mediante ensayos uniaxiales: a menor tamaño de árido, mejor comportamiento tiene una mezcla con microfibras de PVA.

Sin embargo, desde un punto de vista estructural, esto no implica una mejora significativa ya que 0,55 metros de desplazamiento de techo es un valor muy elevado y que difícilmente se alcanza en un contexto real. Por último, en el caso del hormigón con menor árido (Figura 4.19) se obtuvo resultados bastante similares entre los casos sin y con PVA, dando a entender que incluso en el mejor de los casos, según lo concluido de los gráficos de ensayos uniaxiales, la inclusión de microfibra de PVA no implica mejora ante un análisis Pushover.

En resumen, las conclusiones más relevantes obtenidas mediante este trabajo fueron las siguientes:

- En compresión, con microfibras de PVA, la resistencia siempre disminuirá y se obtendrá un poco de ductilidad, esto observable en la caída suave de la curva tensión-deformación.
- En tracción, las microfibras no alteran considerablemente la resistencia aunque si dejan una tensión residual que se mantiene casi constante, agregando un poco de ductilidad con ello.
- Tanto un aumento en tamaño máximo de árido como en cantidad de fibra implican una reducción de capacidad máxima a compresión.
- Existe una cierta cantidad de ductilidad adquirida tanto a compresión como a tracción, sin embargo, estas están vinculadas a deformaciones últimas asociadas a tensiones bajas (en relación a la tensión máxima de la curva).
- El análisis Pushover confirma que a mayor tamaño máximo de árido menos efectiva es la adición de microfibras de PVA. A su vez, demuestra que desde un punto de vista estructural, la microfibra no genera mejoras de comportamiento.

# Bibliografía

- [1] Aghdasi, P., Heid, A. E., & Chao, S. H. (2016). Developing Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete for Large-Scale Structural Applications. *ACI Materials Journal*, 113(5), 559-570.
  
- [2] Águila, 2010. *Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida*. Trabajo fin de Master. Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, Universidad politécnica de Madrid.
  
- [3] Bentur, A., & Mindess, S. (2014). *Fibre reinforced cementitious composites*. 2nd Ed., CRC Press.
  
- [4] Cadoni, E., Meda, A., & Plizzari, G. A. (2009). Tensile behaviour of FRC under high strain-rate. *Materials and structures*, 42(9), 1283-1294.
  
- [5] Deng, M., Pan, J., & Liang, X. (2018). Uniaxial Compressive Test of High Ductile Fiber-Reinforced Concrete and Damage Constitutive Model. *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, Article ID 4308084.
  
- [6] Felekoğlu, B., Tosun-Felekoğlu, K., & Gödek, E. (2015). A novel method for the determination of polymeric micro-fiber distribution of cementitious composites exhibiting multiple cracking behavior under tensile loading. *Construction and Building Materials*, 86, 85-94.
  
- [7] Holschemacher, K., & Höer, S. (2008). Influence of PVA fibers on load carrying capacity of concrete with coarse aggregates. *7th Int. Rilem Symp. on Fibre Reinforced Concrete: Design and Applications*, BEFIB, 219-229
  
- [8] INN, 1975, NCh 1017. Of. 75. “Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción”, Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.

- [9] INN, 2010, NCh 3171. Of. 2010. “Diseño estructural - Disposiciones generales y combinaciones de cargas”, Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- [10] Khan, S., & Ayub, T. (Septiembre, 2016). Modelling of the pre and post-cracking response of the PVA fibre reinforced concrete subjected to direct tension. *Construction and Building Materials*, 120, 540-557.
- [11] Kim, J. H., Robertson, R. E., & Naaman, A. E. (1999). Structure and properties of poly (vinyl alcohol)-modified mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, 29(3), 407-415.
- [12] Kullaa, J. (1994). Constitutive modelling of fibre-reinforced concrete under uniaxial tensile loading. *Composites*, 25(10), 935-944.
- [13] Li, M., & Li, V. C. (2013). Rheology, fiber dispersion, and robust properties of engineered cementitious composites. *Materials and structures*, 46(3), 405-420.
- [14] Li, V.C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A., & Saito, T. (2002). Interface Tailoring for Strain-Hardening Polyvinyl Alcohol-Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC). *Materials Journal*, 99(5), 463-472.
- [15] Li, Y., & Liu, Z. J. (2014). Study on mechanical performance and constitutive equation of high toughness PVA-FRCC under uniaxial compression. *Journal of Building Materials*, 17(4), 606-612.
- [16] Li, Z., Li, F., Chang, T. P., & Mai, Y. W. (1998). Uniaxial tensile behavior of concrete reinforced with randomly distributed short fibers. *Materials Journal*, 95(5), 564-574.
- [17] López, Mauricio, & Castro, José Tomás. (2010). Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo. *Revista ingeniería de construcción*, 25(3), 419-431.
- [18] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, properties and materials*, 3rd Ed., McGraw-Hill.

- [19] Melón. (2016). *Ficha cemento especial Melón*. Recuperado de: <http://www.melon.cl/wp-content/uploads/2016/12/Ficha-cemento-especial-Melon.pdf>
- [20] Pan, Z., Wu, C., Liu, J., Wang, W., & Liu, J. (2015) Study on mechanical properties of cost-effective polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). *Construction and Building Materials*, 78, 397-404
- [21] Qiu, J., Lim, X. N., & Yang, E. H. (2017). Fatigue-induced in-situ strength deterioration of micro-polyvinyl alcohol (PVA) fiber in cement matrix. *Cement and Concrete Composites*, 82, 128-136
- [22] Sahmaran, M., Yücel, H. E., Demirhan, S., Arýk, M. T., & Li, V. C. (2012). Combined effect of aggregate and mineral admixtures on tensile ductility of engineered cementitious composites. *ACI Materials Journal*, 109(6), 627
- [23] Sasmal, S., & Avinash, G. (2016). Investigations on mechanical performance of cementitious composites micro-engineered with poly vinyl alcohol fibers. *Construction and building material*, 128, 136-147

# Anexo

## A. Gráficos mezclas finales a tracción

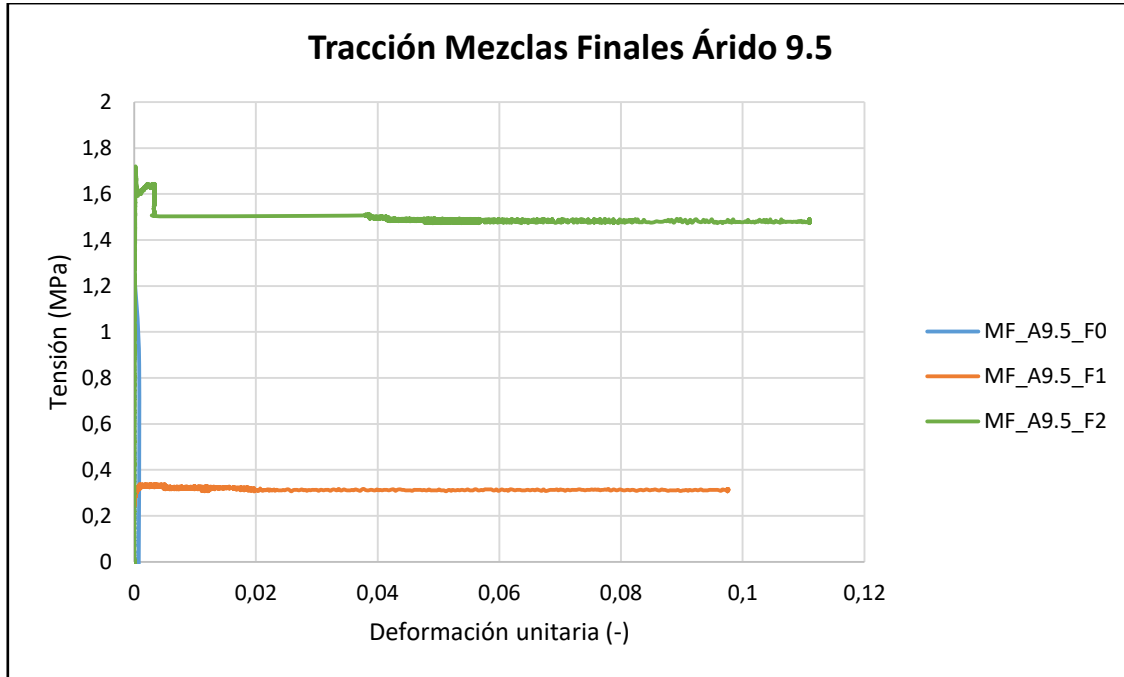


Figura A.1 Gráficos de tracción para probetas con Dmax 9,5 mm de las mezclas finales.

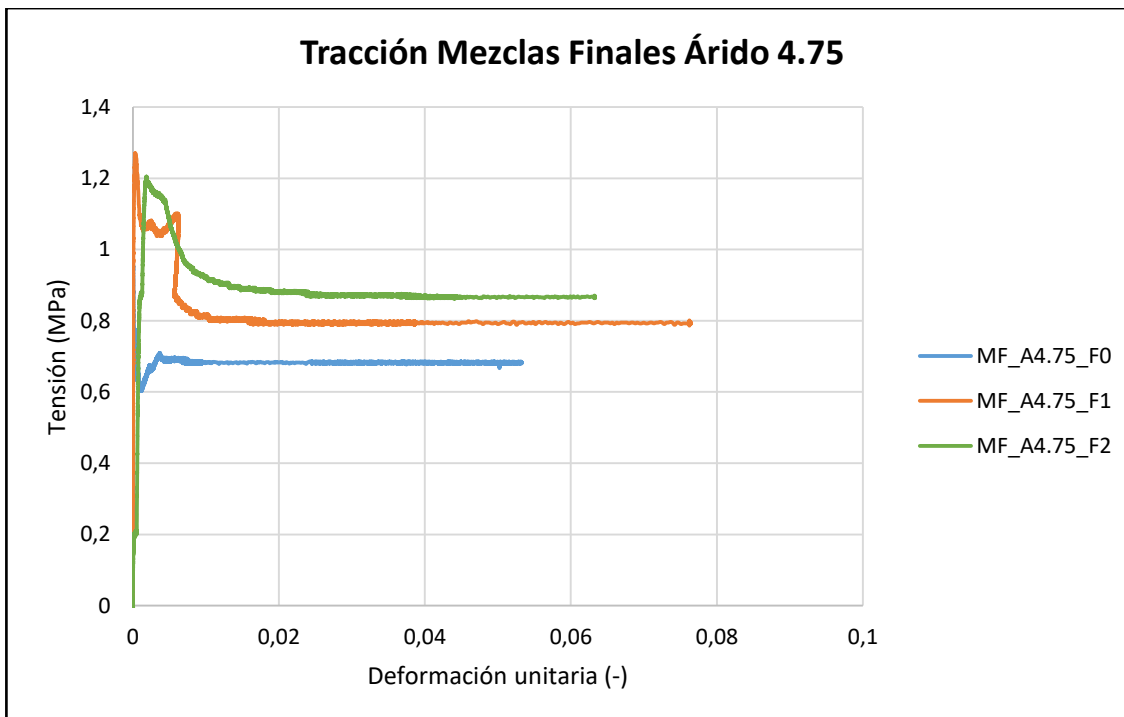


Figura A.2 Gráficos de tracción para probetas con Dmax 4,75 mm de las mezclas finales.

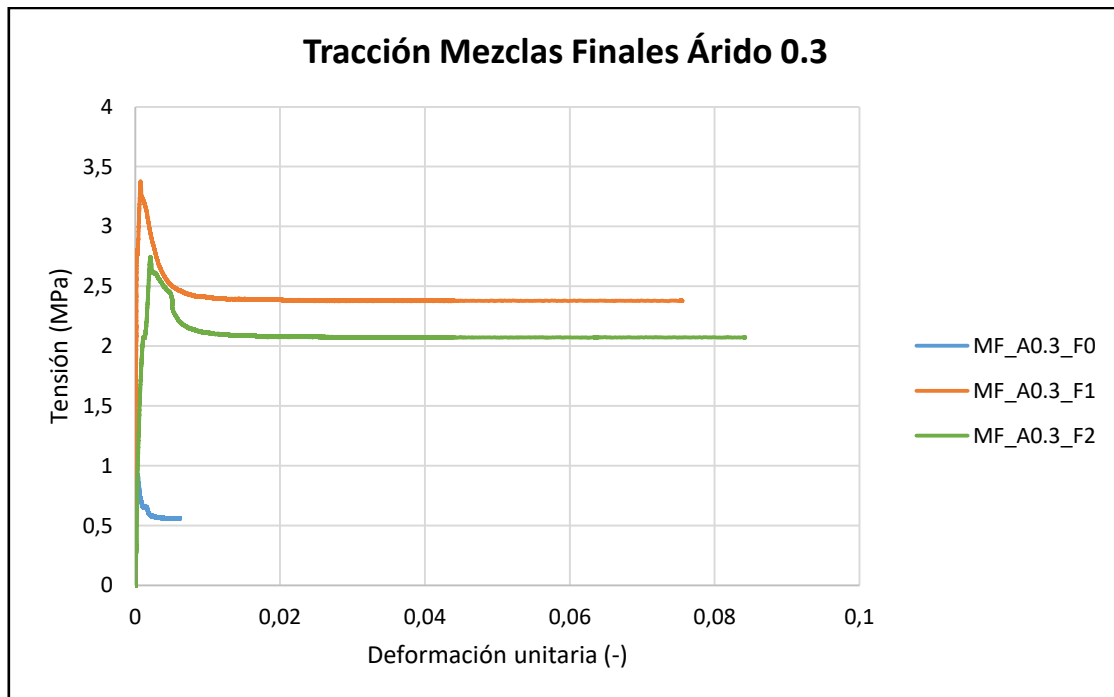


Figura A.3 Gráficos de tracción para probetas con Dmax 0,3 mm de las mezclas finales.